

Trabajo Fin de Grado

Estudio de la transmisión de vibraciones en una
cocina de inducción con ventilación integrada

Autor

Álvaro de Miguel Portillo

Director

Dr. Juan Lladó Paris

Escuela de Ingeniería y Arquitectura
2020

Resumen

El objetivo del trabajo es el desarrollo y puesta a punto de una metodología de medida experimental para conocer la transmisión de vibraciones en una cocina debidas al sistema de extracción de humos y la aplicación a un sistema existente en el mercado, lo que permitirá al diseñador conocer el comportamiento dinámico de la fuente de excitación, de la importancia de las distintas vías de transmisión y del efecto que tienen las vibraciones en las placas electrónicas de potencia. Los conocimientos adquiridos serán utilizados en futuros diseños mejorando la predicción de la respuesta vibratoria de especial importancia para el diseño mecánico y su fiabilidad, resultando un producto con un mayor nivel de aceptabilidad y confianza.

Del sistema completo se han extraído los componentes principales trasmisores de vibración desde el ventilador hasta el *cooktop*, que son los que se han estudiado en detalle tanto por separado como en conjunto. Además de éstos se deben estudiar los tipos de unión entre ellos y cómo afectan a la transmisión de vibraciones, objetivo principal del estudio.

Posteriormente se ha procedido al desarrollo de la metodología de medida, la implementación de esta con elementos auxiliares y la posterior toma de medidas experimentales, siguiendo un orden riguroso. Todo ello se ha sometido a un análisis y presentación de resultados.

Con ello se ha aprendido desde el uso del software de los elementos de medida hasta el posterior tratamiento de los datos obtenidos, el diseño de una metodología específica de medición para satisfacer las necesidades, posterior análisis de resultados y uso de software de simulación.

Índice

| | |
|--|----|
| 1. Introducción | 1 |
| 1.1. ¿Qué es el sistema <i>venting</i> ? | 1 |
| 1.2. Problemática que presenta el sistema <i>venting</i> | 3 |
| 1.3. Objeto y alcance | 5 |
| 1.4. Tareas realizadas y cronograma | 5 |
| 2. Descripción de los elementos y las uniones del sistema sometido a estudio | 7 |
| 2.1. Ventilador, voluta y carcasa | 8 |
| 2.2. Placas con electrónica, inductores y panel táctil | 8 |
| 2.3. Cristal, filtro y mueble | 9 |
| 2.4. Uniones del sistema | 10 |
| 3. Conocimientos teóricos previos | 13 |
| 3.1. Conocimientos teóricos sobre instrumentos y medición de vibraciones | 13 |
| 3.1.1. Conocimientos sobre acelerómetros y el analizador FFT | 15 |
| 4. Desarrollo de una metodología de medida | 19 |
| 4.1. Porqué se mide. Objetivos del proceso de medida | 19 |
| 4.2. Con qué se mide. Descripción del equipo empleado | 19 |
| 4.3. Cómo se mide. Metodología de medida | 20 |
| 4.3.1. Preparación del sistema para el proceso de medida | 20 |
| 4.3.2. Metodología de medida | 22 |
| 4.4. Dónde se mide | 23 |
| 4.5. Qué se obtiene. Explicación de resultados | 24 |
| 4.5.1. Aceleración: 3 niveles | 27 |
| 4.5.2. Aceleración: <i>overall</i> | 27 |
| 4.5.3. Velocidad: 3 colores | 28 |
| 4.5.4. Velocidad: <i>overall</i> | 28 |
| 4.5.5. <i>Waterfall</i> , 3D | 29 |
| 4.5.6. <i>Waterfall</i> , 2D | 29 |
| 4.6. Problemática que presenta esta metodología. Soluciones | 30 |
| 4.7. Ejemplo: 4 puntos de medida | 31 |

| | |
|--|----|
| 5. Análisis de resultados | 37 |
| 5.1. Nivel de vibración <i>overall</i> | 37 |
| 5.2. Frecuencias relevantes | 42 |
| 6. Influencia de inductores y electrónica en la transmisión de vibraciones | 47 |
| 7. Estudio de las vibraciones transmitidas a los componentes electrónicos | 51 |
| 8. Mapa de vibración global del cristal vitrocerámico | 55 |
| 8.1. Metodología de medida | 55 |
| 8.2. Tratamiento de resultados | 56 |
| 9. Conclusiones. Trabajo futuro | 59 |
| 10. Bibliografía | 61 |
| Índice de figuras | 63 |
| Índice de tablas | 67 |
| Listado de símbolos | 69 |
| Listado de abreviaciones | 71 |
| 11. Anexo I: Características de los elementos del sistema | 73 |
| 11.1. Ventilador | 73 |
| 11.2. Voluta | 73 |
| 11.3. Carcasa | 73 |
| 11.4. Placas con electrónica e inductores | 73 |
| 12. Anexo II: Ampliación de conocimientos teóricos previos | 75 |
| 12.1. Señales vibratorias | 75 |
| 12.2. Tipos de filtros | 77 |
| 12.3. FFT y DFT | 77 |
| 12.4. Acelerómetros | 80 |
| 12.5. Análisis FFT de dos canales y funciones empleadas | 82 |
| 13. Anexo III: Características del equipo empleado y gráficas | 85 |
| 13.1. Señales vibratorias | 85 |
| 13.2. Tipos de filtros | 85 |
| 13.3. Gráficas | 85 |
| 13.3.1. Puntos de la unión ventilador - voluta | 86 |
| 13.3.2. Puntos de la unión voluta – carcasa | 89 |
| 13.3.3. Puntos de la placa interior: ejes X e Y | 92 |

| | |
|---|-----|
| 13.3.3.1. Puntos X1 – X2 – X3 | 92 |
| 13.3.3.2. Puntos X4 – X5 – X6 | 95 |
| 13.3.3.3. Puntos Y7 – Y8 – Y9 | 98 |
| 13.3.3.4. Puntos Y10 – Y11 – Y12 | 101 |
| 13.3.4. Puntos de la placa interior: eje Z | 104 |
| 13.3.4.1. Puntos Z1 – Z2 – Z3 | 104 |
| 13.3.4.2. Puntos Z4 – Z5 – Z6 | 107 |
| 13.3.4.3. Puntos Z7 – Z8 – Z9 | 110 |
| 13.3.4.4. Puntos Z10 – Z11 – Z12 | 113 |
| 13.3.5. Puntos del cristal, parte izquierda | 116 |
| 13.3.6. Puntos del cristal, parte derecha | 120 |
| 13.3.7. Puntos del mueble | 124 |
| 14. Anexo IV | 129 |
| 14.1. Mapas de velocidad de vibración | 129 |
| 14.2. Mapas de aceleración de vibración | 131 |

1. Introducción

Este capítulo proporciona información sobre el sistema *venting* aplicado a cocinas de inducción: su irrupción en el mercado, funcionamiento y problemática que presenta. También se ofrece una explicación del estudio llevado a cabo en este proyecto, así como sus aplicaciones futuras.

1.1 ¿Qué es el sistema *venting*?

El sistema *venting* supone una alternativa a los sistemas de extracción de humos habituales empleados en cocinas. Una campana tradicional se ha considerado comúnmente como el sistema de aspiración más efectivo que se puede instalar en una cocina, debido a que atrapa los humos y vapores generados directamente al salir de los recipientes empleados. No obstante, el sistema *venting* se puede considerar como una buena alternativa a la campana, incluyendo todo el sistema de aspiración de gases incorporado en la cocina de inducción. De esta manera, los gases generados circulan en dirección descendente y se evita así la instalación de una campana, se aumenta el espacio en la cocina y se consigue un diseño más sofisticado. El sistema aspira el aire atravesando la superficie de la encimera, circula a través de un filtro y viaja por un conducto de tiro descendente debajo de la cocina, para luego ser enviado fuera de la vivienda. Además, el aire puede pasar a través de filtros y ser devuelto, siendo ésta una de las principales ventajas del sistema.



Figura 1.1: Ejemplo de sistema *venting*. (Roggema, 2016)

La disposición de los elementos en estas cocinas suele ser similar. En el centro se encuentra el extractor de gases, normalmente ocupando desde la parte anterior a la posterior de la cocina. En las zonas laterales se encuentran los inductores y en la parte anterior de la cocina se encuentra el cuadro de mandos que controla todo el sistema.

Hoy en día existe una gran variedad de modelos de cocinas de inducción con *venting* incorporado:

- Miele KMDA 7633 FR (1): ofrece cuatro zonas de cocción e incluye el sistema “Con@ctivity”, que regula automáticamente los niveles del ventilador. Posee una calificación energética A++, un consumo de 25 kWh por año y una emisión máxima de ruido de 69 dB(A) según la regulación EU N° 65/2014. (Miele, 2019)
- Gaggenau CVL 420 Flex (2): posee dos áreas de cocción de 38 cm de largo por 24 cm de ancho. Ofrece una potencia de 3300 W para cada zona en modo normal y 3700 W en modo *Booster*. Su calificación energética es A con un consumo de 42,7 kWh por año y una emisión máxima de ruido de 68 dB(A). (Magnetic Cooky, 2020)
- Jenn-Air JID4436ES (3): ofrece un sistema de control del tiempo de cocción para cada recipiente, además posee una tapa que cubre el sistema de extracción de gases cuando no se está utilizando. Su calificación energética es A con un consumo de 41 kWh por año y una emisión máxima de ruido de 69 dB(A). (Jenn-Air, 2016)
- Bosch PXX875D34E (4): tiene 17 niveles de velocidad del extractor e incluye el sistema “PowerBoost” que ayuda a ahorrar hasta un 50%. Posee una calificación energética de A, un consumo de 51 kWh por año y una emisión máxima de ruido de 70 dB(A). (BOSCH, 2019)



Figura 1.2: Comparativa de cocinas. (Miele, 2019) (Magnetic Cooky, 2020) (Jenn-Air, 2016) (BOSCH, 2019)

1.2 Problemática que presenta el sistema *venting*

Dos de los principales problemas que presentan el sistema son las vibraciones y el ruido, siendo las fuentes de excitación el ventilador y las fuerzas electromagnéticas que se generan durante la cocción. En este proyecto se ha estudiado la parte que hace referencia a las vibraciones que puede transmitir el ventilador. Esto permitirá obtener una visión global de la transmisión de la vibración desde el ventilador hasta la encimera y el comportamiento de cada uno de los elementos del sistema *venting*, todo ello con vistas a mejorar el diseño actual y su aplicación a diseños futuros.

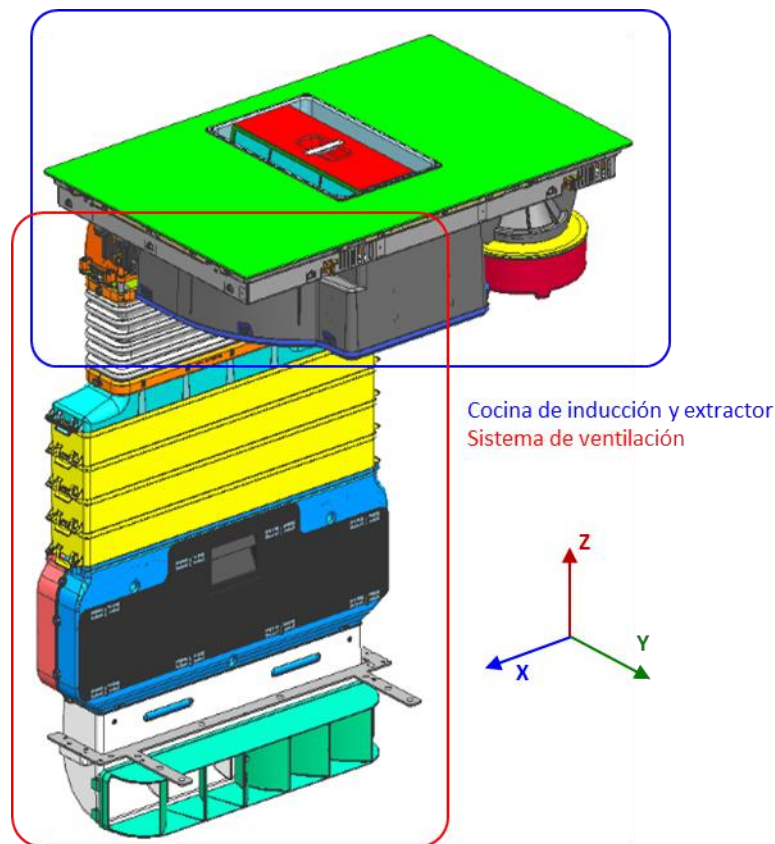


Figura 1.3: Sistema *venting* completo

La Figura 1.4 muestra un esquema de los problemas producidos por vibraciones. Los componentes electrónicos pueden fallar por estar expuestos a fatiga o que su funcionamiento no sea adecuado. El cristal vitrocerámico se encuentra sometido a vibraciones, transmitidas por las uniones de éste con la placa que contiene a la electrónica. Las vibraciones a la que está sometida la encimera pueden afectar tanto a los utensilios de cocina como a las manos y brazos del usuario, produciendo lo que se conoce como *Hand Arm Vibration (HAV)*. Es por ello por lo que se ha de realizar el estudio y medición de

éstas desde el ventilador hasta la encimera, observando cuáles son los valores máximos obtenidos, a qué frecuencia y qué medidas se pueden tomar para disminuirlos. Además, también se estudian las vibraciones transmitidas a los componentes electrónicos y las generadas por éstos, siendo estas últimas igual de importantes.

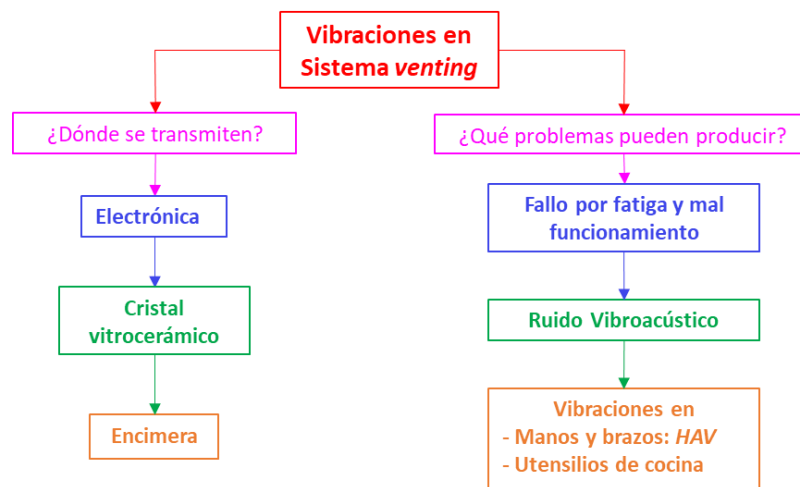


Figura 1.4: Problemas producidos por vibraciones

En este proyecto se ha estudiado un modelo sofisticado dentro de los sistemas de cocinas de inducción. De éste se separa el sistema de ventilación excepto el ventilador, la voluta y la carcasa (Figura 1.3). Se trabaja únicamente con la cocina de inducción y el extractor, denominado a partir de ahora “sistema a estudio” (Figura 1.5).

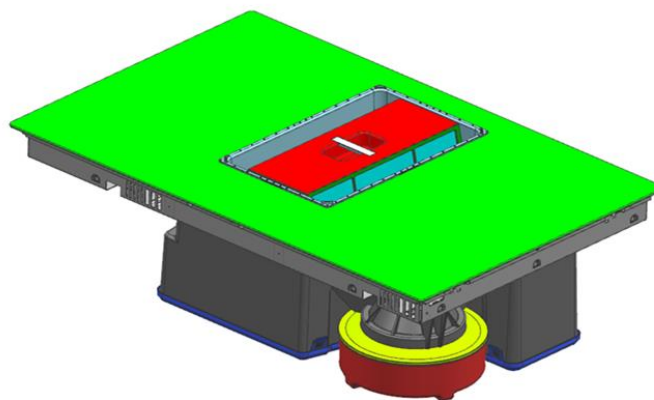


Figura 1.5: Sistema a estudio

1.3 Objeto y alcance

Con la realización de este trabajo se amplía el conocimiento de la transmisión de vibraciones en una cocina con sistema *venting* debidas al ventilador. El alumno crea una metodología de medida experimental adaptada al producto que se desea analizar. Esto permitirá al diseñador del producto conocer el comportamiento dinámico de la fuente de excitación y la importancia de las vibraciones en las placas electrónicas de potencia. Con ello, los resultados se pueden tanto emplear para el producto existente como adaptar a futuros sucesores, obteniendo un producto de mayor calidad.

1.4 Tareas realizadas y cronograma

En primer lugar, el alumno ha tenido que aprender el manejo del software necesario para la realización del análisis. Para ello, se le han enseñado las nociones básicas y se le han entregado diferentes manuales de los que ha podido hacer uso. Todo ello se ha realizado durante los tres meses previos al inicio del curso académico en el que se ha realizado el trabajo.

Posteriormente, durante los meses de septiembre y octubre, el alumno ha desarrollado los programas necesarios para el análisis del sistema según la metodología establecida, así como el control automático de la fuente de alimentación y la elaboración del circuito que la conecta al sistema. Además se han extraído del sistema completo los componentes principales transmisores de vibración desde el ventilador hasta el cristal vitrocerámico y se han colocado en el mueble proporcionado por la empresa.

A partir de noviembre se comienza a obtener una serie de resultados. No obstante, se han tenido que realizar algunas modificaciones a la disposición inicial del sistema, como por ejemplo la fijación de éste a la pared con escuadras. Esta serie de cambios se decidió tras haber analizado las gráficas iniciales.

En diciembre se ha presentado una primera tanda de resultados a la empresa. Ahí se mantuvo el enfoque que se le dio previamente. A partir de ese momento se inició la obtención de una gran cantidad de gráficas, presentando la mayoría de ellas en el mes de marzo.

El mes de abril se ha dedicado al estudio del efecto de los inductores y electrónica en la transmisión de vibraciones. Para ello ha sido necesario la colocación de los acelerómetros en el interior del sistema, siendo un éste un proceso especialmente pausado.

La última parte del trabajo la ocupa la realización de los mapas de vibración del cristal vitrocerámico. Se ha tenido que desarrollar el programa que se ha implementado y se han realizado las medidas necesarias para su obtención. Todo ello desde la segunda mitad del mes de abril hasta la finalización del curso académico.

1.5 Contenido de la memoria

La memoria explica el trabajo realizado durante el curso académico. Ofrece una introducción sobre el sistema *venting* en el capítulo 1 y una descripción del sistema sometido a estudio en el capítulo 2. Se especifican sus elementos y uniones, siendo éstas las partes de mayor importancia en el estudio de la transmisión de vibraciones. Además se ofrece una aproximación de los conocimientos teóricos previos necesarios para el completo entendimiento del proceso realizado en el capítulo 3, así como una ampliación de éstos en el Anexo II.

Posteriormente, el capítulo 4 aborda el desarrollo de la metodología de medida. Se trata del capítulo principal, dentro del cual se explica cómo se han implementado los programas, cómo se ha preparado el sistema, dónde y con qué se ha medido y qué resultados se han obtenido. Además se acompaña de un apartado en el que se muestran las gráficas principales de un ejemplo de cuatro puntos de medida. El Anexo III acompaña a este capítulo y muestra la casi totalidad de las gráficas obtenidas.

Los capítulos 5 y 6 se dedican a la explicación de un análisis de resultados y de la influencia de los inductores en la transmisión de vibraciones. El capítulo 7 comenta un breve estudio de las vibraciones transmitidas a los componentes electrónicos.

Finalmente, el último capítulo aborda la explicación de los mapas de vibración realizados. Además, en el Anexo IV se adjuntan diversos mapas obtenidos. El trabajo concluye en el capítulo 9.

2. Descripción de los elementos y las uniones del sistema sometido a estudio

Este capítulo proporciona información sobre los elementos del sistema a estudio desde el ventilador a la encimera, sus materiales, dimensiones y funciones. Además se describen las uniones existentes entre ellos.¹

El sistema a estudio consta de los siguientes elementos principales (Figura 2.1):

- Ventilador, voluta y carcasa.
- Placas con electrónica e inductores.
- Cristal, filtro y mueble.



Figura 2.1: Elementos principales del sistema a estudio

¹ Todas las características se encuentran disponibles en el Anexo I.

Se realizan medidas en las uniones entre la voluta y la carcasa, en la placa interior, en la placa de la electrónica, en el cristal vitrocerámico y en el mueble. En la placa portainductores no se realizan.

2.1 Ventilador, voluta y carcasa

El ventilador posee un tipo de motor: M3G074 – CF, un peso de 2,15 kg y una velocidad de rotación de 1760 rpm. Está compuesto mayormente de acero galvanizado y sus dimensiones son 95,9 x 200 x 200 mm. Consta de 38 palas y su función principal es la absorción y extracción de gases generados en la cocina de inducción.

La voluta está compuesta de Polyflam® inyectado RIPP 374 ND CS1, posee unas dimensiones de 417,3 x 322,4 x 102,6 mm y su función principal es la proyección del aire saliente del ventilador.

La carcasa está compuesta de Polyflam® inyectado RIPP 374 ND CS1, posee unas dimensiones de 642 x 392 x 143 mm y su función principal es la sujeción del conjunto y el almacenamiento de residuos (Figura 2.2).

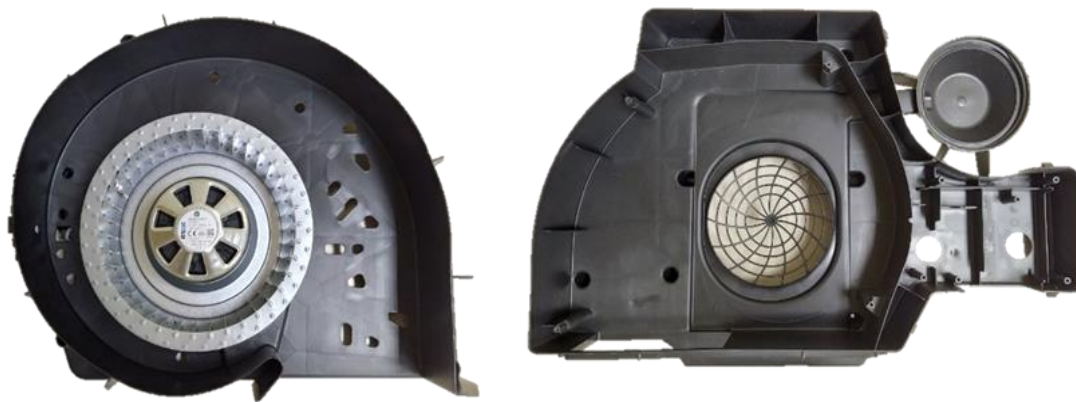


Figura 2.2: (Izquierda) Ventilador y voluta. (Derecha) Carcasa

2.2 Placas con electrónica, inductores y panel táctil

La placa interior está formada de acero galvanizado y posee unas dimensiones de 769,6 x 483,2 x 1,2mm. Su función principal es la sujeción de la electrónica y la carcasa.

La placa portainductores está formada de aluminio y posee unas dimensiones de 765,4 x 479,5 x 1,5mm. Su función principal es la sujeción y el posicionamiento de los inductores y el panel táctil.

La función principal de la electrónica es el control de la cocina de inducción; la de los inductores es la generación del campo magnético propio de la inducción; la del panel táctil es la selección del nivel de cocción y del ventilador (Figura 2.3).



Figura 2.3: (Izquierda) Placa interior y electrónica.
(Derecha) Placa portainductores, panel táctil e inductores.

2.3 Cristal, filtro y mueble

La función principal del cristal vitrocerámico es el soporte de los recipientes de la cocina; la del filtro es impedir la intrusión al ventilador de agentes externos al mismo; la del mueble es simulación de encimera cotidiana, proporcionado por la empresa para la realización del estudio (Figura 2.4).

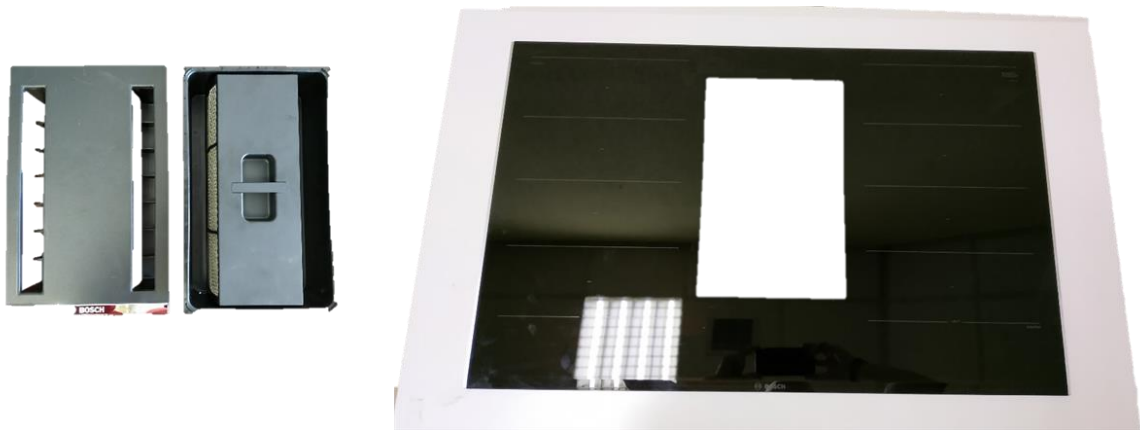


Figura 2.4: (Izquierda) Filtro. (Derecha) Cristal vitrocerámico y mueble.

2.4 Uniones del sistema

Se procede a la descripción de las uniones que componen el sistema a estudio:

- Unión ventilador – voluta: formada por 4 tornillos roscados con cabeza Torx en dirección Z colocados en la parte central de la voluta (Figura 2.5).
- Unión voluta – carcasa: formada por 4 tornillos roscados con cabeza Torx en dirección Z colocados en la parte exterior de la voluta.
- Unión carcasa – placa interior: formada por 8 tornillos roscados con cabeza Torx en dirección Z repartidos por la carcasa.
- Unión placa interior – cristal: formada por 12 tornillos roscados con cabeza Philips, 6 en dirección X y otros 6 en dirección Y (Figura 2.6).
- Unión cristal – mueble: el cristal sustenta el sistema a estudio sobre el mueble en 4 puntos en dirección Z.

El mueble se encuentra unido a la pared mediante dos escuadras metálicas a cada lado situadas en el plano XY. Existen paredes en tres lados del mueble, mientras que en el lado anterior no hay ninguna pared, ya que simula la existencia de un cajón en la cocina.

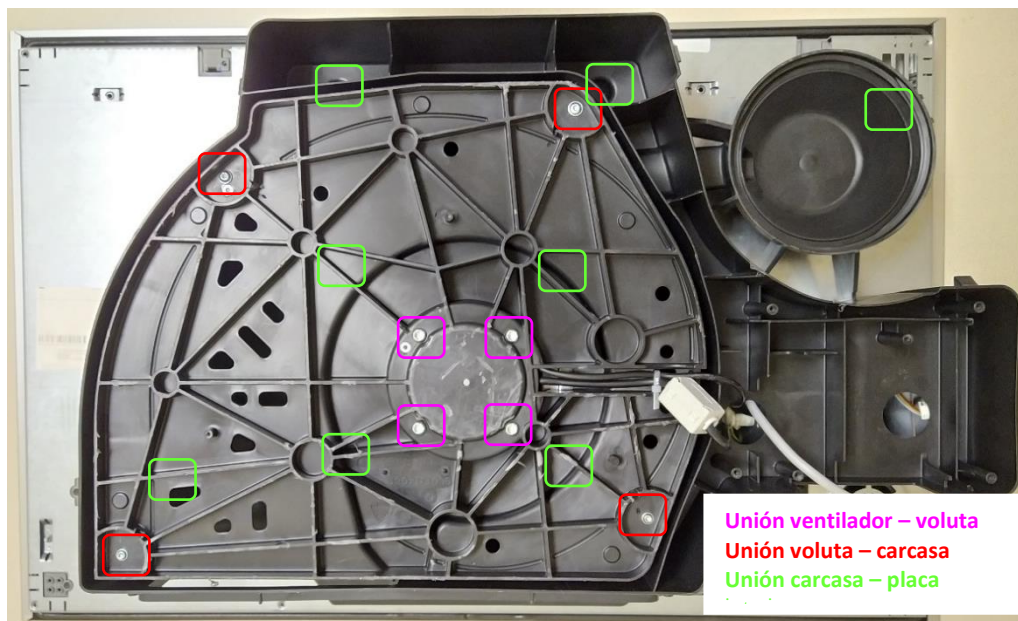


Figura 2.5: Uniones: ventilador – voluta, voluta – carcasa, carcasa – placa interior



Figura 2.6: Uniones: placa interior – cristal, cristal – mueble

3. Conocimientos teóricos previos

Este capítulo proporciona una aproximación teórica de los conocimientos previos necesarios para abordar el estudio experimental llevado a cabo en este proyecto: conceptos de vibraciones, análisis espectral e instrumentación de medida.²

3.1 Conocimientos sobre instrumentos y medición de vibraciones

Una vibración se define como una oscilación donde la cantidad es un parámetro que define el movimiento de un sistema mecánico. Una oscilación es la variación, normalmente en función del tiempo, de la magnitud de una cantidad respecto a una referencia especificada, cuando la magnitud es alternativamente mayor y menor que la referencia (Brüel & Kjær). En el trabajo se lleva a cabo la ejecución de diversos análisis espectrales. Es necesario trasladar todos los resultados obtenidos del dominio temporal al frecuencial debido a que los efectos individuales están mezclados en el dominio temporal y separados en el frecuencial. (Brüel & Kjær)

En las mediciones llevadas a cabo en este proyecto se emplea como unidad de medida el dB, además de referencias normalizadas. La conversión de las unidades estándar a dB para aceleración y velocidad se muestra en las Ecuaciones 3.1 y 3.2.

$$L_a[\text{dB}] = 10 \log \frac{a^2}{a_{\text{ref}}^2} = 20 \log \frac{a}{a_{\text{ref}}} = 20 \log \frac{a}{10^{-6}} \quad (3.1)$$

$$L_v[\text{dB}] = 10 \log \frac{v^2}{v_{\text{ref}}^2} = 20 \log \frac{v}{v_{\text{ref}}} = 20 \log \frac{v}{10^{-9}} \quad (3.2)$$

En la Figura 3.1 se incluye un esquema básico indicando el tratamiento al que es sometido la señal desde que se mide hasta que se obtiene su visualización en pantalla. Es necesario el uso de un transductor (del que se habla en profundidad más adelante), un preamplificador, una serie de filtros y un detector.

² Los conocimientos básicos y más avanzados sobre señales vibratorias, FFT y acelerómetros se encuentran en el Anexo II.

El preamplificador se debe emplear porque la entrada de aceleración medida por el transductor es una señal de bajo nivel y alta impedancia. Gracias a este elemento se obtiene una señal de salida calibrada, de alto nivel y baja impedancia. Una vez la señal ha sido amplificada se somete a un filtrado para, posteriormente, obtener sus parámetros relevantes. (Brüel & Kjær)

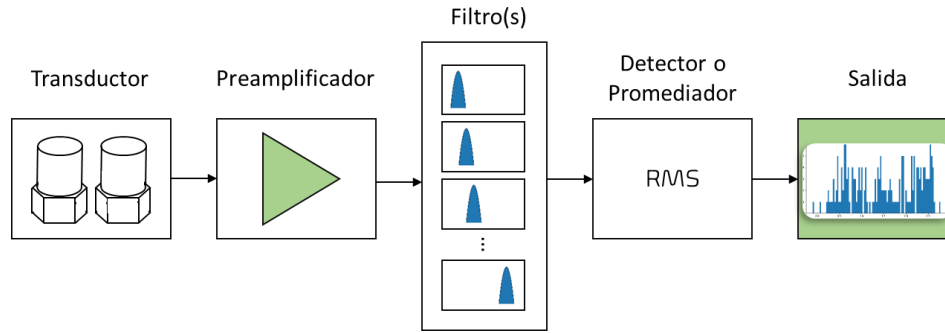


Figura 3.1: Elementos de la cadena de medida

Un filtro se define como un procesamiento matemático aplicado a la señal que se quiere analizar (Brüel & Kjær, 1999). En la parte izquierda de la Figura 3.2 se presenta un filtro ideal, mientras que en la parte derecha se presentan varios filtros reales con diferentes órdenes. El ancho de banda, B , se define como la diferencia de frecuencias sobre las que, al aplicar el filtro a la señal, la atenuación de ésta es igual o menor que 3 dB, comparado con la frecuencia central, f_0 (Ecuación 3.3) (Brüel & Kjær, 1999). Se debe de tener en cuenta para cualquier análisis de señales en frecuencia que el producto del ancho de banda elegido por el tiempo de medida debe ser menor o igual que uno, lo que es conocido como la Ley Fundamental del Análisis en Frecuencia (Ecuación 3.4).

$$B = f_2 - f_1 \quad (3.3)$$

$$B \cdot t \geq 1 \quad (3.4)$$

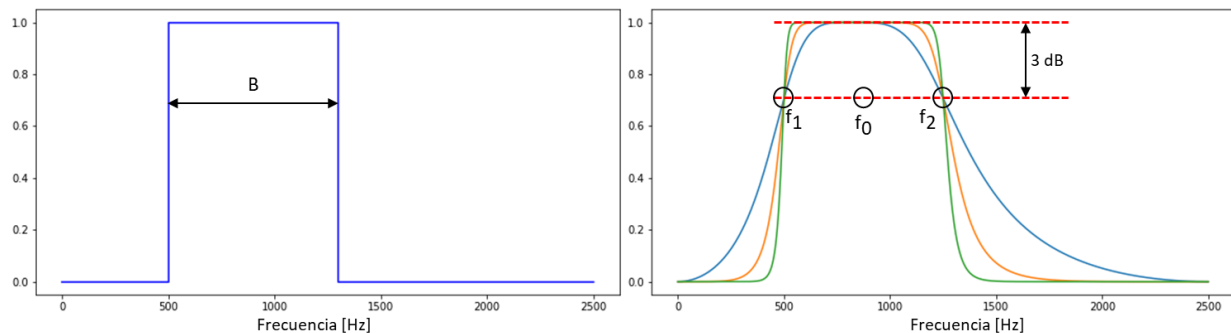


Figura 3.2: (Izquierda) Filtro paso-banda ideal. (Derecha) Filtros paso-banda reales

Después de haber realizado el proceso de filtrado, es necesario una conversión de la señal analógica a formato digital. Para ello, se precisa de un analizador que aplique a la señal la Transformada Discreta de Fourier, DFT. Ésta posee tres problemas inherentes a su uso (Brüel & Kjær, 1999):

- *Aliasing*: ocasionado por el muestreo en el tiempo. Se soluciona con un filtro anti-aliasing, f_s , y con una frecuencia de muestreo $f_s > 2f_c$.
- *Leakage*: ocasionado por la limitación temporal de la señal. Se soluciona con el uso de una ventana correcta, siendo la ventana una función por la que se multiplica la señal de entrada. El solapamiento correcto de ventanas proporciona continuidad a la función en el dominio frecuencial.
- Efecto *Picket Fence*: ocasionado por el muestreo en frecuencia. Se soluciona con el uso de una ventana correcta.

Además es necesario la realización de un promedio (*averaging*) de la señal recibida. Este promedio puede ser lineal o exponencial:

- El promedio exponencial es un proceso que otorga pesos diferentes a los datos actuales y de tiempos anteriores. El peso otorgado a los datos anteriores comparado con el otorgado a los actuales depende de la constante de tiempo exponencial. (National Instruments, 2020)
- El promedio lineal es un proceso que otorga los mismos pesos a los datos actuales y anteriores. (National Instruments, 2020)

3.1.1 Conocimientos sobre acelerómetros y el analizador FFT

A lo largo de los años han existido numerosos aparatos de medición de vibraciones: la sonda de apoyo mecánico, que todavía se puede encontrar en algunas fábricas pero se considera obsoleta; la sonda de proximidad, que se emplea para la medición de excentricidad de ejes y espesores de películas de aceite; captadores de velocidad y acelerómetros. Los últimos poseen el rango más amplio de funcionamiento, tanto en frecuencia como en amplitud relativa de onda. (Brüel & Kjær)

Dentro de los acelerómetros se pueden distinguir varios tipos (Brüel & Kjær):

- Piezorresistivos y de capacidad variable: pueden medir sucesos estáticos (aceleración constante o centrífuga, choques o impulsos de larga duración) y pueden soportar temperaturas hasta 125 °C. Se emplean en menor medida que los piezoeléctricos.
- Piezoeléctricos: son los transductores más usados para mediciones de vibración. Son relativamente robustos y fiables, por lo que sus características permanecen estables a lo largo del tiempo. Además no necesitan de una fuente de alimentación para funcionar, no tienen partes móviles y se puede

integrar sus señales de aceleración de salida fácilmente para obtener las señales de velocidad y desplazamiento. El corazón de un acelerómetro piezoeléctrico es una parte de material piezoeléctrico, normalmente una cerámica ferroeléctrica polarizada. Cuando se excita mecánicamente, ya sea con flexión, compresión o cizalladura, genera una carga eléctrica a través de sus polos que es proporcional a la fuerza aplicada. La masa del acelerómetro debe de ser menor que la décima parte de la masa dinámica de la pieza en la que se sitúa.

Existen tres configuraciones principales de acelerómetros (Figura 3.3): (Brüel & Kjær, 1982)

- Tipo Cizalladura (1): la masa ejerce una fuerza de cizalladura en el elemento piezoeléctrico. Posee un mayor rango de frecuencia, así como una baja sensibilidad a la deformación de la base y a variaciones de temperatura. No obstante, tiene una menor sensibilidad a la variación de la masa del objeto de medida.
- Tipo Compresión (2): la masa ejerce una fuerza compresiva en el elemento piezoeléctrico. Posee una mayor sensibilidad a una variación de la masa del objeto de medida, así como más robustez. No obstante, esta configuración tiene una menor resistencia al choque y alta sensibilidad a una variación de temperatura.

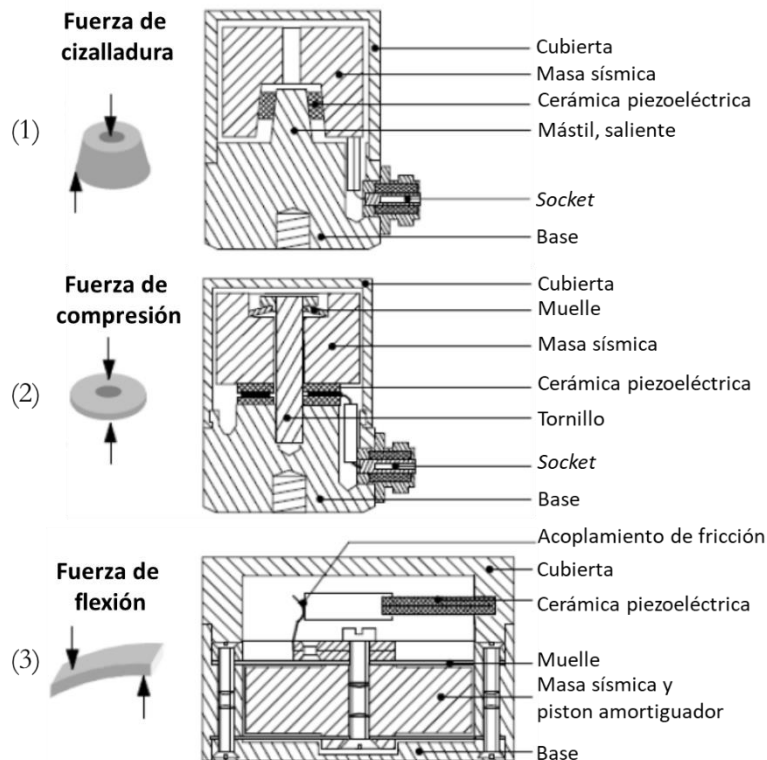


Figura 3.3: Configuraciones principales de acelerómetros. (Juan Lladó)

- Tipo Flexión (3): la masa ejerce una fuerza de flexión en el elemento piezoeléctrico. Posee, como el acelerómetro de compresión, una mejor sensibilidad a la variación de la masa. No obstante, su rango de frecuencia es pequeño, posee una baja resistencia al choque y una alta sensibilidad a las variaciones de temperatura.

Además, existe un amplio rango de acelerómetros disponibles. Se pueden dividir en los siguientes grupos (Figura 3.4): (Brüel & Kjær, 1982)

- Acelerómetros de propósito general (1): satisfacen la mayoría de las necesidades. Están disponibles con el conector tanto en la parte superior como en el lateral. Sus características son:
 - Sensibilidad: 10 a 100 mV/g
 - Peso: 10 a 50 g.
 - Rango de frecuencia: 0 a 12.000 Hz.
- Acelerómetros miniatura (2): se emplean para medidas de alta frecuencia o de estructuras delicadas, tienen muy poco peso. Sus características son:
 - Sensibilidad: 0.5 a 3 mV/g
 - Peso: 0.4 a 2 g.
 - Rango de frecuencia: 1 a 25.000 Hz.
- Otros tipos: aquí se mencionan algunos acelerómetros optimizados para propósitos específicos:
 - Acelerómetros para medidas triaxiales (3).
 - Acelerómetros para monitorizar permanentemente maquinaria industrial.
 - Acelerómetros para muy altas temperaturas (4).
 - Acelerómetros para edificios y vibraciones estructurales.
 - Acelerómetros para calibración.

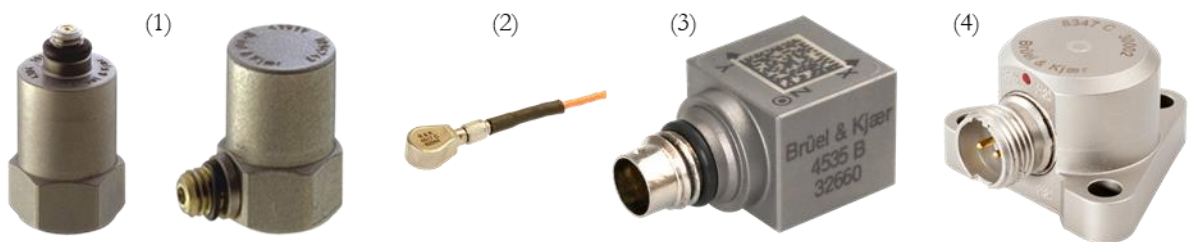


Figura 3.4: Diferentes acelerómetros. (Brüel & Kjær)

La Figura 3.5 muestra el proceso de elección del acelerómetro. Dependiendo del rango de aceleración y de frecuencia a medir, se puede elegir entre un tipo de acelerómetro de uso general con peso y sensibilidad medios o uno pequeño y ligero, empleado para altas frecuencias. (Brüel & Kjær)

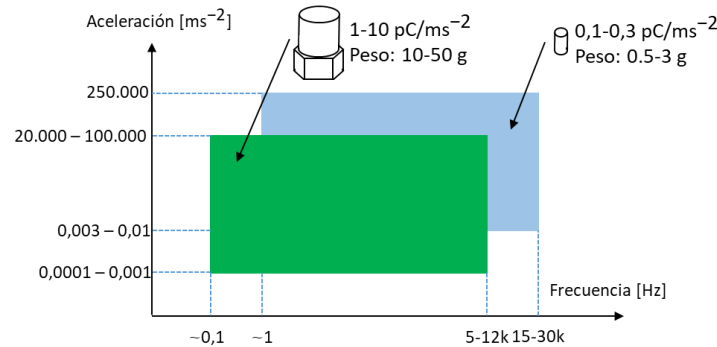


Figura 3.5: Rangos de actuación de cada tipo de acelerómetro

A continuación se menciona el analizador FFT (Figura 3.6). Es el encargado de aplicar los filtros a la señal de entrada, realizar la conversión analógica a digital, desarrollar el análisis FFT y obtener las promediaciones y autospectros requeridos. Consta de dos memorias, cada una de ellas se emplea alternativamente utilizando un tiempo de registro, mientras se realiza el análisis FFT utilizando un tiempo de cálculo. Un requisito para que no se pierdan datos en el análisis es que el tiempo de registro debe ser mayor o igual que el tiempo de cálculo.

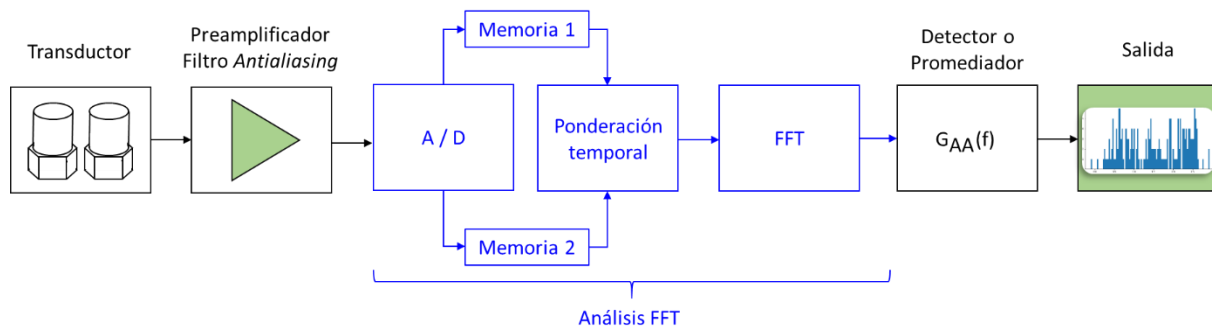


Figura 3.6: Esquema de funcionamiento de un analizador FFT

Existen además dos tipos de análisis a llevar a cabo: el análisis de señal y del sistema. En el análisis de señal se mide la señal de vibración, $b(t)$, del sistema en condiciones de uso habituales, además no se mide la excitación. Sin embargo, en el análisis del sistema se genera una excitación, $a(t)$, mediante un martillo sónico, para después medir la respuesta vibratoria del sistema, $b(t)$. (Brüel & Kjær, 1999)

4. Desarrollo de una metodología de medida

En este capítulo se explica detalladamente cómo se ha realizado el proceso de medida, cuáles son sus objetivos, qué equipo se ha empleado y cómo ha sido el proceso de obtención de resultados y el tratamiento de datos para la obtención de tablas y gráficas.³

4.1 Porqué se mide. Objetivos del proceso de medida

El objetivo principal del proceso de medida es el conocimiento del comportamiento vibratorio del sistema a estudio cuando está excitado por el ventilador. Para ello es necesario el desarrollo del proceso, además del tratamiento y análisis de datos obtenidos. Se siguen una serie de pasos:

- Jerarquización de la transmisión de vibraciones desde el ventilador hasta el cristal vitrocerámico a través de las partes del sistema a estudio.
- Determinación de las frecuencias relevantes de las vibraciones causadas por el ventilador trabajando a velocidad *Booster* y las amplitudes correspondientes a la velocidad de vibración.
- Obtención de la evolución de la velocidad de vibración total (llamadas *overall*) para los diferentes niveles de operación del ventilador.
- Desarrollo de gráficas *Waterfall* en 2D y 3D para proporcionar una visión intuitiva del comportamiento vibratorio de las partes del sistema a estudio.
- Desarrollo de mapas de vibración del cristal vitrocerámico excitado por el ventilador a velocidad *Booster* para observar la distribución de los niveles de velocidad de vibración en las zonas de cocinado.
- Supervisión de la medida de transmisión de vibraciones a los inductores y electrónica.

4.2 Con qué se mide. Descripción del equipo empleado

En este apartado se explica tanto el equipo como el software empleado en el proceso de medida y tratamiento de datos. El equipo forma parte del área de Ruido y Vibraciones perteneciente al Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Zaragoza.

³ Para más detalles sobre el equipo de medida y sobre todas las gráficas obtenidas, acudir al Anexo III.

El equipo de medida Brüel & Kjær empleado está formado por:

- Multianalizador FFT: modelo 3160 – A – 042, cuya función es la obtención de gráficas FFT instantáneamente con posibilidad de cambiar unidades, referencias y formato de cada una de ellas.
- 4 acelerómetros tipo 4397, empleados para la medición de los parámetros necesarios en los diferentes puntos de medida.

Se emplea además una fuente de alimentación programable: modelo TENMA 72 – 2540, con un voltaje nominal de 30 V y una intensidad nominal de 1 A. Gracias a la fuente, es posible el control del ventilador mediante un programa desarrollado en entorno MATLAB.

A continuación se indica el software necesario para la implementación de los programas:

- MATLAB R2018a : utilizado para el tratamiento de datos y obtención de gráficas.
- Microsoft Office Excel 2013 : empleado para la exportación de datos de los programas.
- Brüel & Kjær PULSE LabShop 17.1.1: programa asociado al equipo de medida, empleado para la obtención directa de datos para su posterior tratamiento. Ofrece la posibilidad de editar los parámetros de las gráficas obtenidas.
- Brüel & Kjær PULSE Reflex 17.1.1: programa asociado al equipo de medida y empleado en el tratamiento de datos. Con este programa se editan más parámetros y se obtienen los datos en el formato deseado para graficarlos posteriormente.

4.3 Cómo se mide. Metodología de medida

En este apartado se explica cómo se ha desarrollado la metodología empleada en la toma de medidas y tratamiento de datos. Además, trata sobre cómo se ha configurado el software para la obtención de los datos obtenidos y qué programas se han implementado para el tratamiento de resultados.

4.3.1 Preparación del sistema para el proceso de medida

Inicialmente se tiene el sistema a estudio colocado en el mueble fabricado por la empresa y éste fijado a la pared. Se procede a desmontar las conexiones que controlan la velocidad del ventilador mediante el panel táctil y se implementa el circuito de la Figura 4.1 empleando la fuente de alimentación programable para variar el voltaje transmitido al ventilador. Dicho circuito se obtiene de un documento proporcionado por el fabricante del ventilador. En la Tabla 4.1 se indica el significado de los elementos que aparecen en la Figura 4.1.

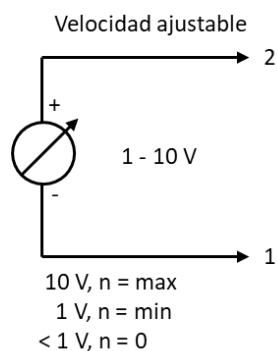


Figura 4.1: Circuito de control del ventilador con velocidad variable

| Conexión | Designación | Función |
|----------|-------------|--|
| 1 | GND | Reference ground for control interface, SELV |
| 2 | 0 – 10V | 0 – 10V |

Tabla 4.1: Parámetros del circuito de control del ventilador. (Ebmpapst, 2004)

Tras haber adaptado el sistema a estudio para controlarlo con la fuente de alimentación, se conectan los ordenadores y el equipo de medida tal y como se muestra en las Figuras 4.2 y 4.3.



Figura 4.2: Disposición del equipo

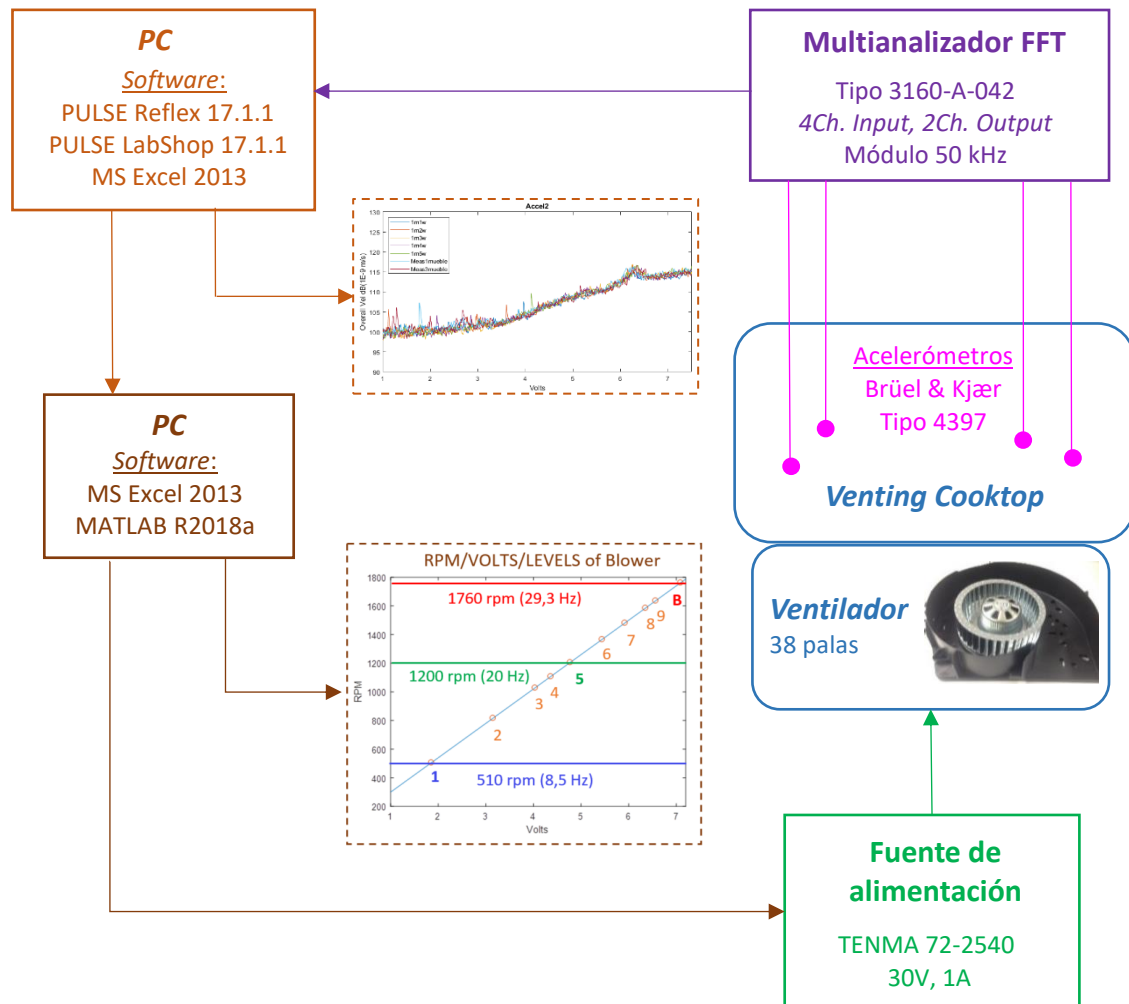


Figura 4.3: Esquema de la disposición del equipo y software empleados

4.3.2 Metodología de medida

Una vez finalizado dicho montaje se estudia la relación entre el voltaje aplicado por la fuente y la velocidad de giro del ventilador. Para ello se mide la velocidad de giro del ventilador correspondiente a cada uno de los niveles del panel táctil, con el micrófono midiendo el pico a la frecuencia de paso de álabe. Los valores obtenidos de las lecturas se guardan en una hoja de cálculo. El proceso se repite en condiciones diferentes y se anotan los resultados sucesivamente. Una vez anotadas varias tandas de datos se realiza una recta con un ajuste por mínimos cuadrados que relaciona la velocidad de giro del ventilador con el voltaje aplicado (Figura 4.4). Al haber sido proporcionados por la empresa las velocidades de giro para cada uno de los niveles del panel táctil, se colocan éstos orientativamente sobre dicha recta.

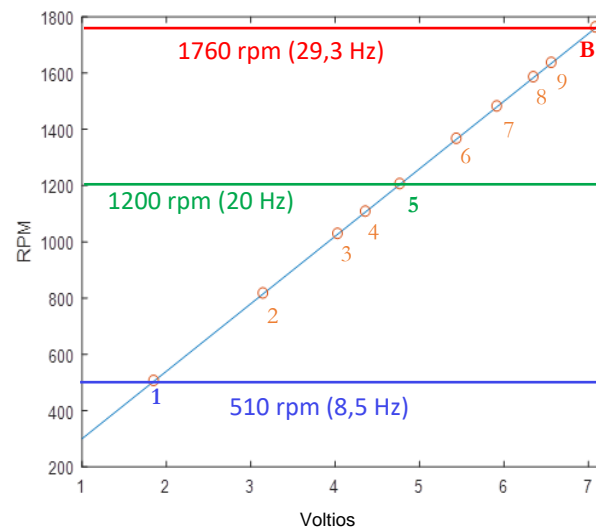


Figura 4.4: Relación entre velocidad de giro, voltaje aplicado y niveles del panel táctil

Tras haber establecido la relación entre voltaje y velocidad de giro del ventilador, se escribe el código necesario en MATLAB para su control manual (Figura 4.5). Se emplea un protocolo MTTI para controlar la fuente de alimentación desde el ordenador.

Posteriormente, se procede a realizar un barrido desde 0 a 10 V para observar la respuesta del sistema a estudio. Directamente del programa PULSE LabShop se obtiene una gráfica en la que se puede observar que la velocidad máxima a la que no varían los niveles de vibración del sistema se alcanza a 7,5 V aproximadamente. Esto se interpreta como el límite superior de la velocidad de giro del ventilador, ya que la respuesta vibratoria del sistema se observa que es constante tras este voltaje. Es por ello por lo que se establece como límite superior para la toma de medidas 7,5 V. Se aumenta 0,01 V cada segundo, puesto que se considera que el sistema se estabiliza para cada voltaje en el tiempo de paso definido.

```

Definir orden:
for 1V to 7.5V:
  V = V + 0.01
  Frecuencia: 1 s
end
end

Emitir orden por salida USB
  
```

Figura 4.5: Esquema básico del código empleado para controlar la fuente de alimentación

Con ello, es posible la obtención de la FFT a cada segundo para cada voltaje proporcionado al sistema. Por tanto, se obtiene información no sólo de los niveles a los que trabaja el ventilador bajo condiciones de servicio, sino también de cómo éste opera entre dichos niveles, pudiendo así averiguar si es más conveniente mantener las velocidades asignadas en el panel táctil o variarlas. El hecho de haber creado un programa que controle automáticamente la velocidad del ventilador para el rango de velocidades empleado en el sistema permite al usuario la realización de un gran número de medidas de una manera más cómoda y rápida. Cada medida consistirá en un barrido desde 1 V hasta 7,5 V variando 0,01 V cada segundo.

4.4 Dónde se mide

En el Capítulo 2 se han explicado tanto los elementos que forman parte del sistema a estudio como las uniones del mismo. La transmisión de vibraciones se lleva a cabo por las uniones de cada uno de los elementos. Es por ello por lo que interesa conocer cuánta vibración existe en cada unión, así como los niveles presentes en el cristal y en la placa interior.

Se miden los siguientes puntos en el orden en que aparecen:

- Unión ventilador – voluta: se colocan 4 acelerómetros orientados según el eje Z en los 4 tornillos de esta unión (Figura 4.6).
- Unión voluta – carcasa: se colocan 4 acelerómetros orientados según el eje Z en los 4 tornillos de esta unión (Figura 4.6).
- Placa interior: por una parte se colocan 4 acelerómetros orientados según el eje Z distribuidos en ambas secciones de la placa según la unión de la placa interior con la carcasa. Por otra parte se colocan los acelerómetros en 12 puntos orientados según los ejes X, Y, Z según las uniones de la placa interior con el cristal vitrocerámico (Figura 4.7).
- Cristal vitrocerámico: se colocan los acelerómetros en 8 puntos orientados según el eje Z, 4 en cada lado (Figura 4.8).

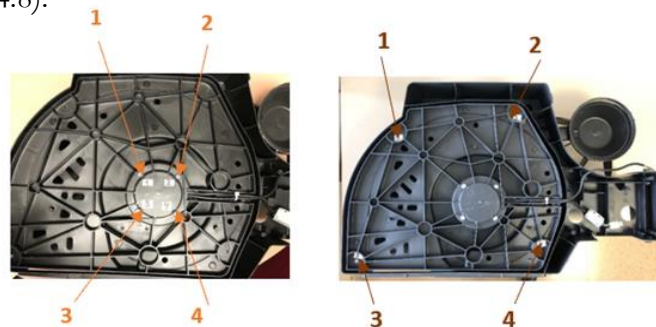


Figura 4.6: (Izquierda) Puntos de medida de la unión ventilador – voluta.
(Derecha) Puntos de medida de la unión voluta – carcasa



Figura 4.7: Puntos de medida de la placa interior

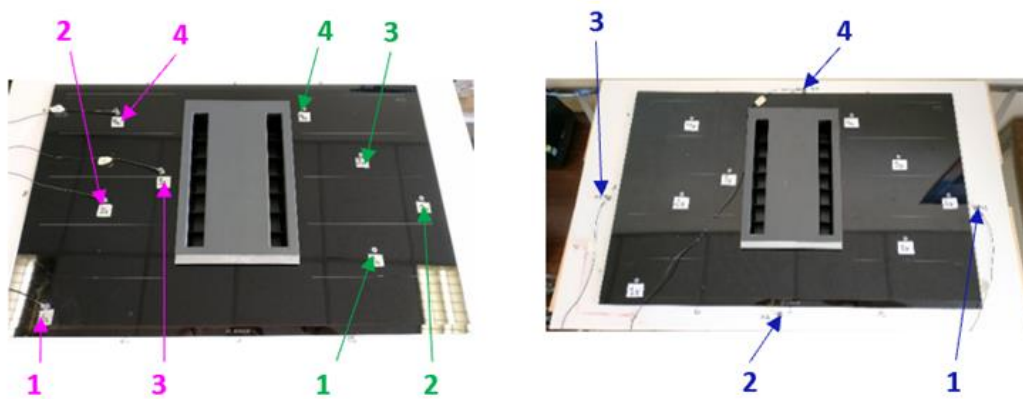


Figura 4.8: Puntos de medida del cristal vitrocerámico

4.5 Qué se obtiene. Explicación de los resultados

Tras realizar una medida, los datos se exportan desde Pulse LabShop hasta una hoja de cálculo Excel. En el entorno MATLAB se elabora un programa que extrae los datos de la hoja de cálculo y los almacena en un espacio de trabajo. Posteriormente se implementa otro programa que extrae las gráficas deseadas (Figura 4.9).

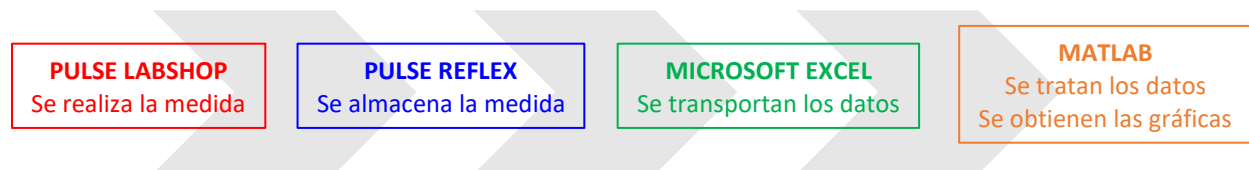


Figura 4.9: Esquema de trabajo

Para cada punto de medida se realizan entre 3 y 8 medidas, realizadas en condiciones de trabajo diferentes para asegurar las condiciones de repetitividad. Antes de obtener todas las gráficas se elige la medida adecuada realizando una comparación de las FFT de velocidad de cada una (Figura 4.10). En este caso como ejemplo, se desecharían las medidas de color morado, azul oscuro, azul claro y naranja, y se elegiría de entre las restantes.

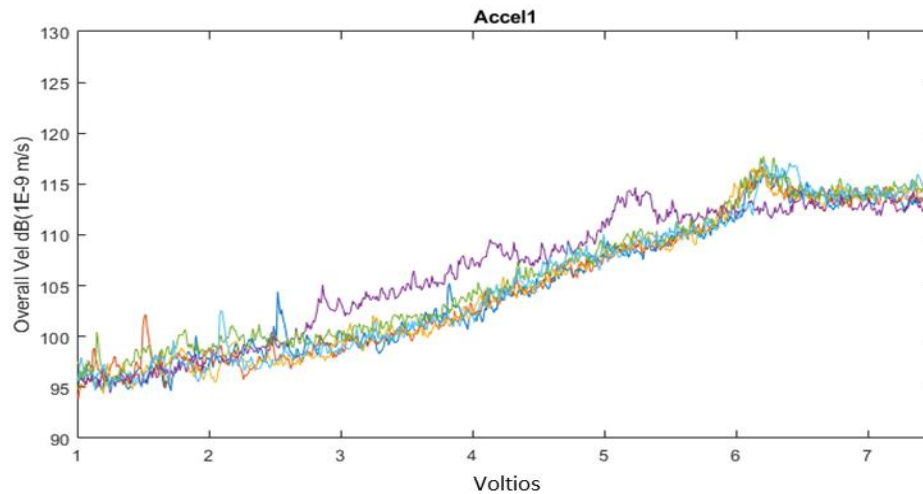


Figura 4.10: Comparación de las FFT de varias medidas del acelerómetro del punto 2i

Tras haber elegido la medida adecuada se procede a la obtención de las gráficas mediante el proceso de trabajo indicado en la Figura 4.11.

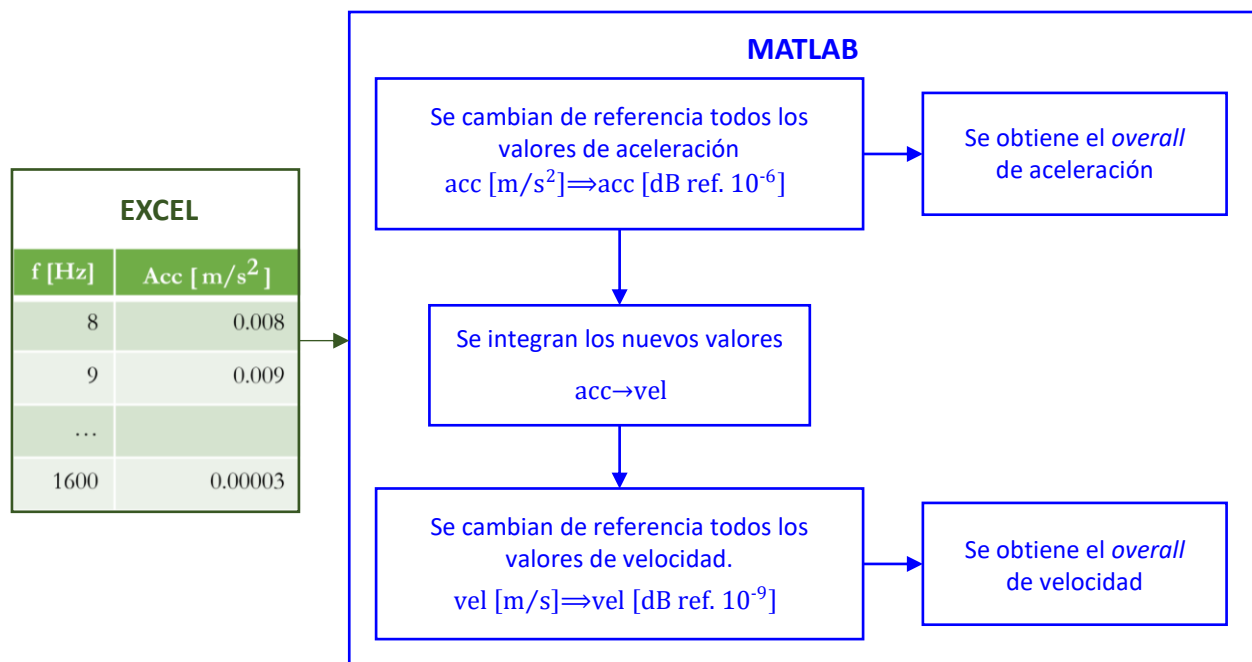


Figura 4.11: Proceso de obtención de datos a través de MATLAB

4.5.1 Aceleración: 3 niveles

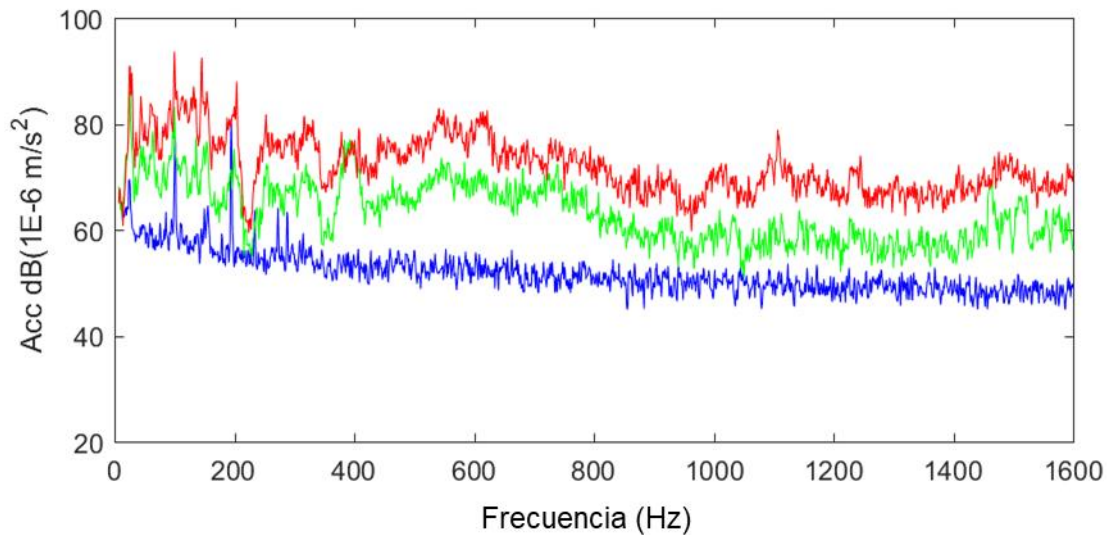
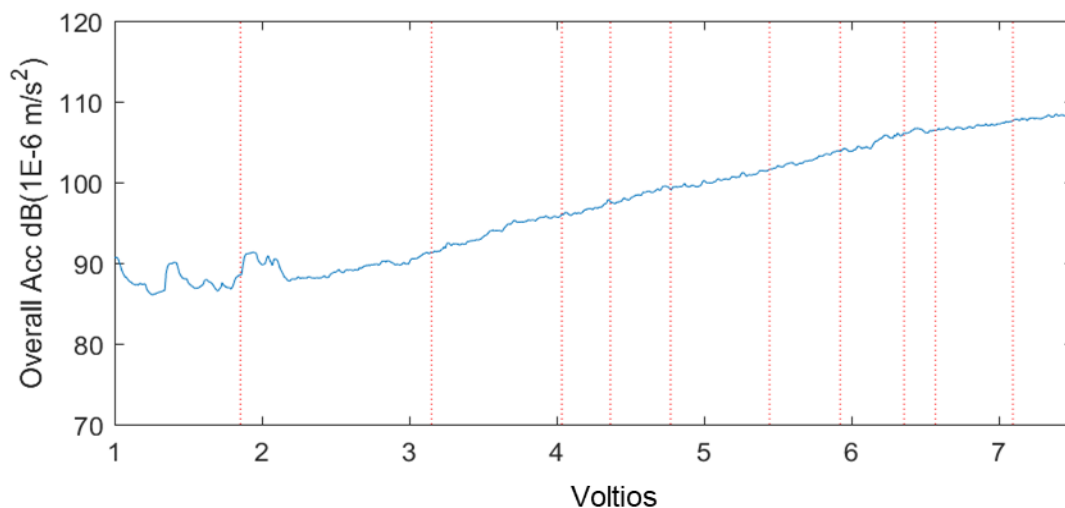


Figura 4.12: Aceleración: 3 niveles

Esta gráfica se obtiene de la matriz de los valores de aceleración con la referencia aplicada. Se extraen tres vectores correspondientes de los niveles de voltaje 1, 5 y *Booster* (Figura 4.4) y se representan frente a la frecuencia.

4.5.2 Aceleración: *overall*

Figura 4.13: Aceleración: *overall*

Esta es la gráfica correspondiente al vector de aceleración *overall* obtenido a partir de la matriz de los valores de aceleración mediante una suma de sus valores para cada frecuencia. Se observa un incremento casi constante de los valores conforme se aumenta el voltaje aplicado, además quedan indicados mediante barras verticales todos los niveles del panel táctil.

4.5.3 Velocidad: 3 niveles

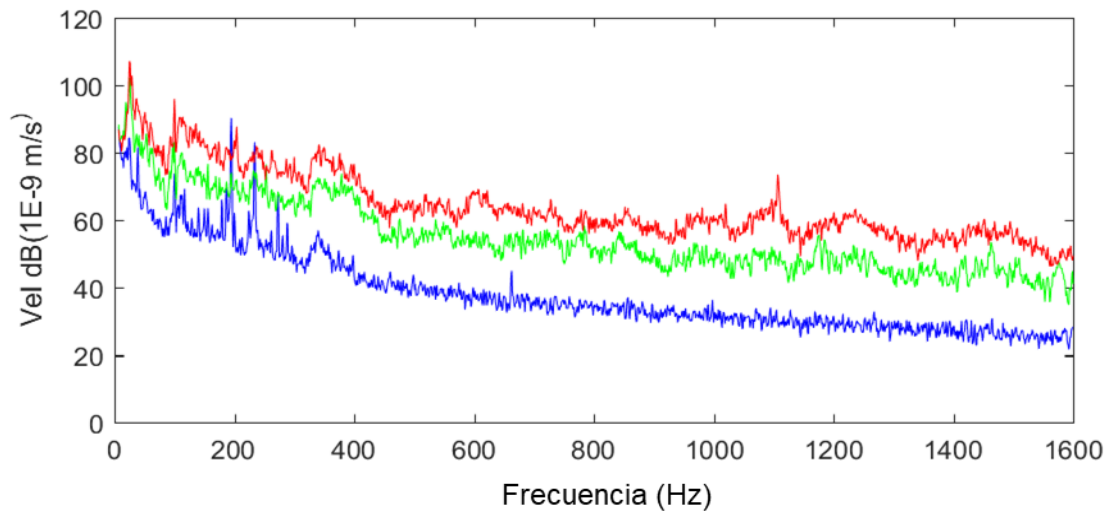


Figura 4.14: Velocidad: 3 niveles

Esta gráfica se obtiene de la misma manera que su homóloga en aceleración, pero integrando previamente sus valores. Se observa un decremento conforme aumenta la frecuencia. Existe un pico perteneciente al nivel *Booster* entre 1.000 y 1.200 Hz.

4.5.4 Velocidad: *overall*

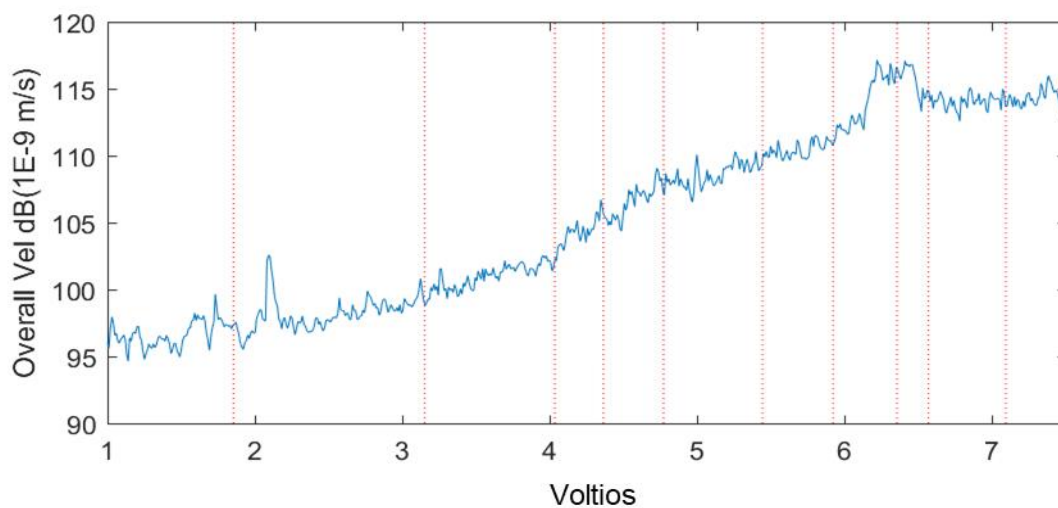


Figura 4.15: Velocidad: *overall*

Obtenida de la misma manera que su homóloga en aceleración, habiendo integrado previamente sus valores. Se observa un incremento más significativo que en la aceleración y unos picos más pronunciados. El valor máximo se alcanza antes de llegar a 7,5 V.

4.5.5 *Waterfall*, 3D

Un *Waterfall* es un diagrama en cascada que consiste en una serie de espectros FFT colocados sucesivamente para generar un gráfico en 3D. Las líneas verticales indican las frecuencias excitadas (frecuencias de resonancia, frecuencias eléctricas...). Las líneas oblicuas muestran los órdenes de excitación. Se denomina “orden de excitación” al producto del número natural n por la velocidad de giro del ventilador en rpm, expresado en Hz. En este caso se ha escogido la presentación de los valores de velocidad con la referencia aplicada. MATLAB tiene una orden específica para generar este tipo de gráficos (Figura 4.16).

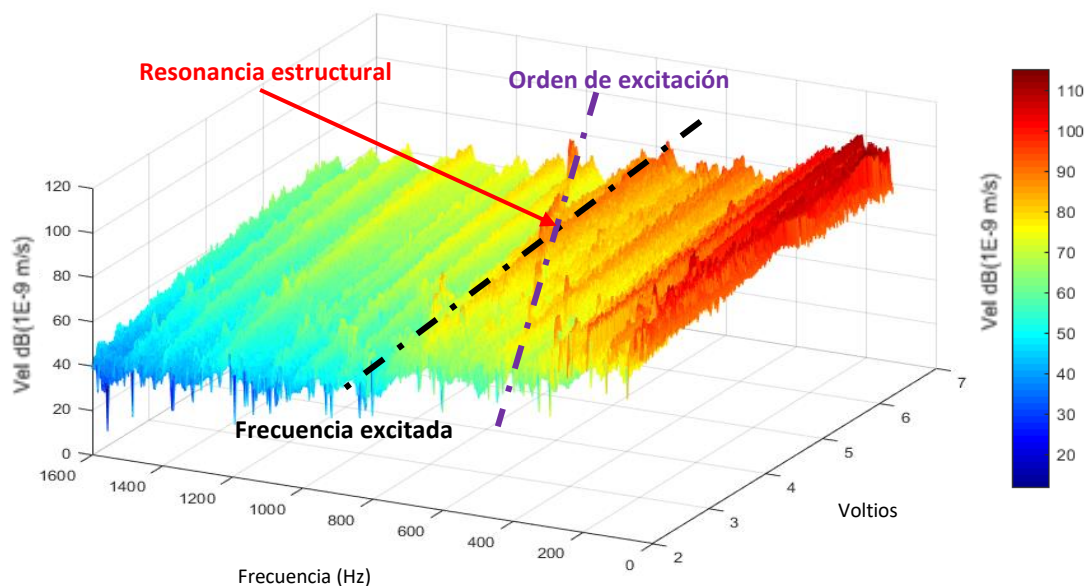
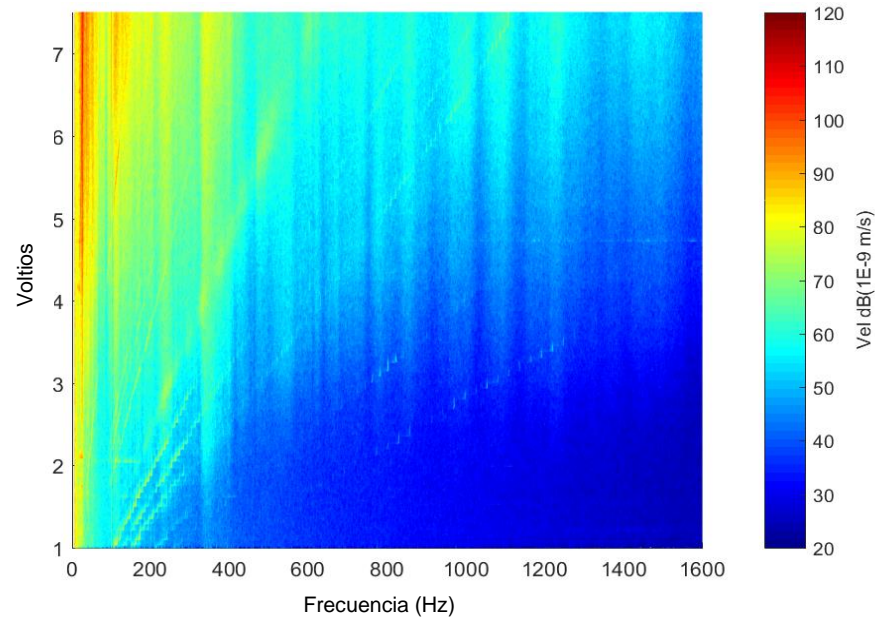


Figura 4.16: *Waterfall* 3D

4.5.6 *Waterfall*, 2D

Un *Waterfall* en 2D es una gráfica que representa una visión cenital del *Waterfall* en 3D. Gracias a la escala de colores, este tipo de gráfica sigue siendo representativo: se pueden apreciar notablemente las frecuencias excitadas (líneas verticales) y los órdenes de excitación (líneas oblicuas). Se obtiene de la misma manera que un *Waterfall* en 3D variando el punto de visualización (Figura 4.17).

Figura 4.17: *Waterfall* 2D

4.6 Problemática que presenta esta metodología. Soluciones

El hecho de seguir este tipo de metodología de medida presenta una serie de problemas inherentes a ella, explicados a continuación en este apartado.

Por un lado existe una clara diferencia entre los valores obtenidos mediante los análisis experimentales y los obtenidos mediante los teóricos (no tratados en este trabajo). Esto se debe a la falta de precisión en la definición de las uniones teóricas, y posiblemente a errores de mallado. Como solución se deciden sustentar los resultados en los análisis experimentales.

Por otro lado el proceso de medida es extenso, siendo necesario la toma de un gran número de medidas para posteriormente obtener una válida. Esto se puede deber tanto a una sobrecarga de los acelerómetros como a cualquier tipo de excitación del sistema provocada por un agente externo al mismo. Se podría solucionar con un mayor aislamiento del sistema a estudio.

Se debe de tener en cuenta la existencia de ruido en las señales recibidas externo a la medida. Este ruido altera la señal recibida. Es necesario minimizarlo lo máximo posible.

4.7 Ejemplo: 4 puntos de medida

En este apartado se muestra un ejemplo de medida de cuatro puntos pertenecientes a una misma zona, en concreto a la parte izquierda del cristal vitrocerámico.

Tras la realización de todas las medidas y su posterior tratamiento en MATLAB, se obtiene una gráfica formada por todas las velocidades *overall* de velocidad de los cuatro acelerómetros (Figura 4.18):

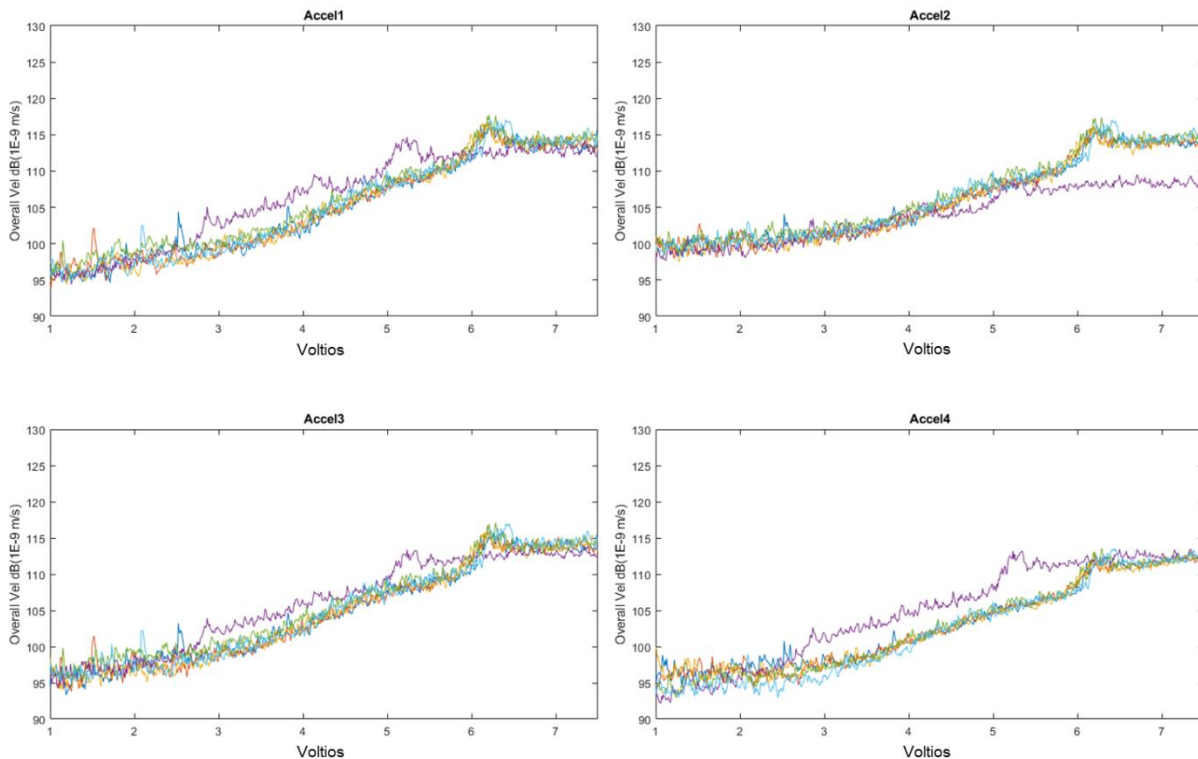


Figura 4.18: Velocidades *overall* de cada acelerómetro de un conjunto de medidas

El procedimiento a seguir una vez obtenidas todas las medidas de los puntos es el siguiente: se observa claramente que la medida violeta se aleja de las demás, por lo que se desecharía. Posteriormente se observan picos puntuales en las medidas roja, azul claro, azul oscuro y verde, por lo que también se eliminarían. Finalmente se elegiría la medida de color naranja.

Una vez obtenida la medida válida se procede a mostrar las velocidades *overall* de todos los acelerómetros contenidas en una misma gráfica (Figura 4.19). La velocidad correspondiente al acelerómetro 4 es menor que las demás debido a que éste se encuentra localizado en la parte del cristal más cercana a la pared, donde el mueble se encuentra completamente unido a ésta. Es lógico

que sea menor, puesto que conforme se aleja de la pared, se incrementa la vibración obtenida debido a la geometría del mueble.

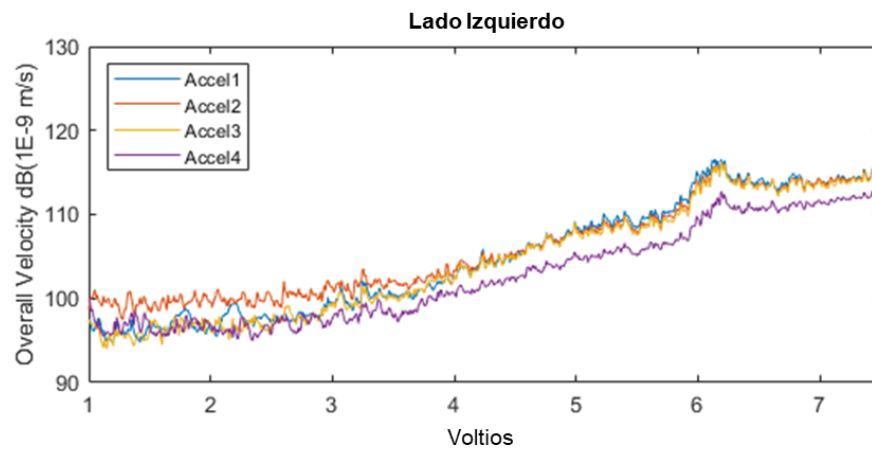


Figura 4.19: Velocidades *overall* de la medida seleccionada

El siguiente paso consiste en la obtención de las gráficas de aceleración y velocidad frente a la frecuencia, resaltando los niveles de velocidad del panel táctil 1, 5 y *Booster* (Figura 4.20). Se aprecia de manera clara el pico mencionado anteriormente entre los valores de 1.000 y 1.200 Hz para la velocidad *Booster*, se corresponde con el orden 38, cuya frecuencia exacta se obtiene multiplicando la velocidad de giro en Hz por 38 palas del ventilador.

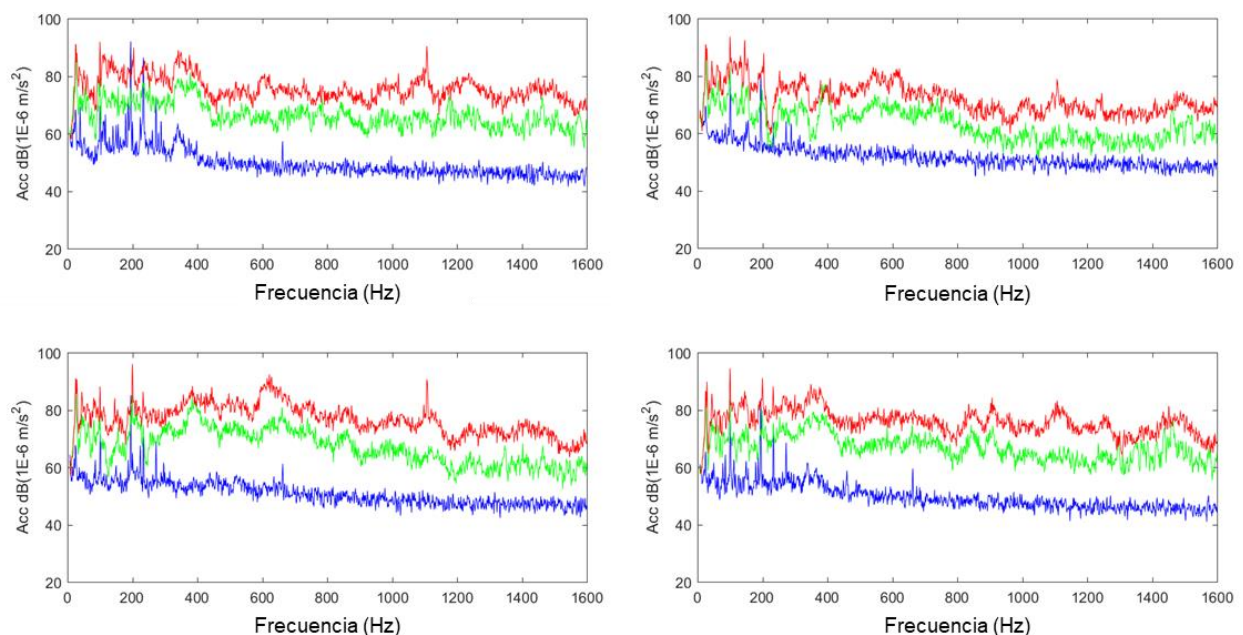


Figura 4.20: Aceleraciones de los niveles 1, 5 y *Booster* de la medida seleccionada

Posteriormente se integran los valores de la matriz de aceleración y se cambia la referencia para obtener las mismas gráficas pero en términos de velocidad (Figura 4.21). Se puede apreciar el claro decremento de los valores al aumentar la frecuencia, mucho más evidente que la gráfica de la aceleración. El pico de orden 38 sigue visible, especialmente en los acelerómetros 1 y 3 (figuras de la izquierda).

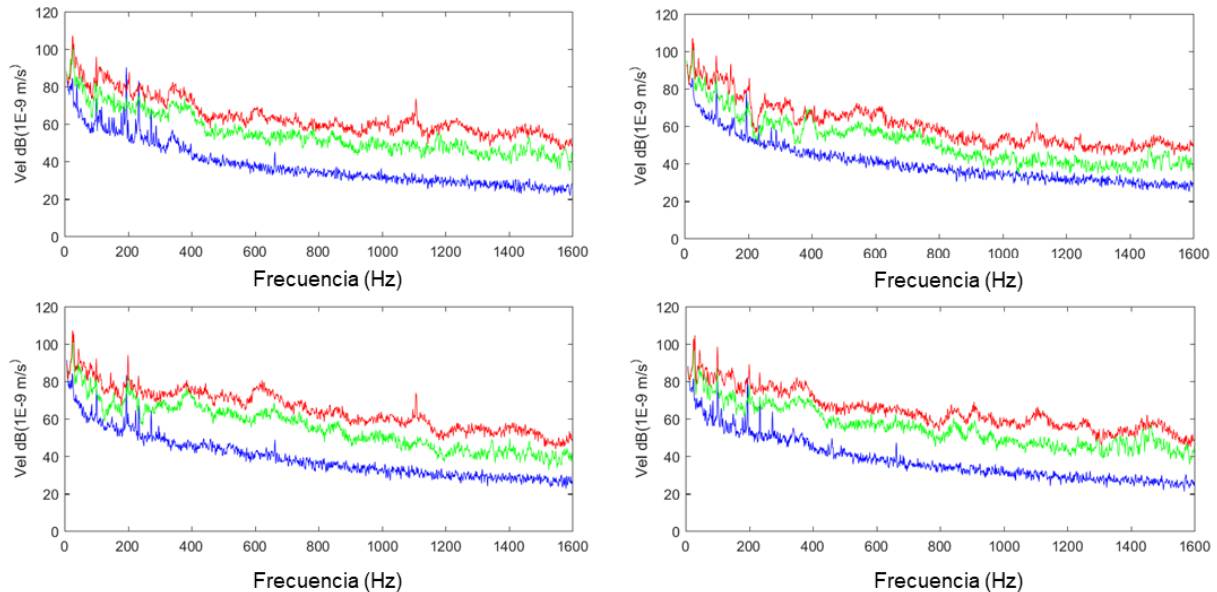
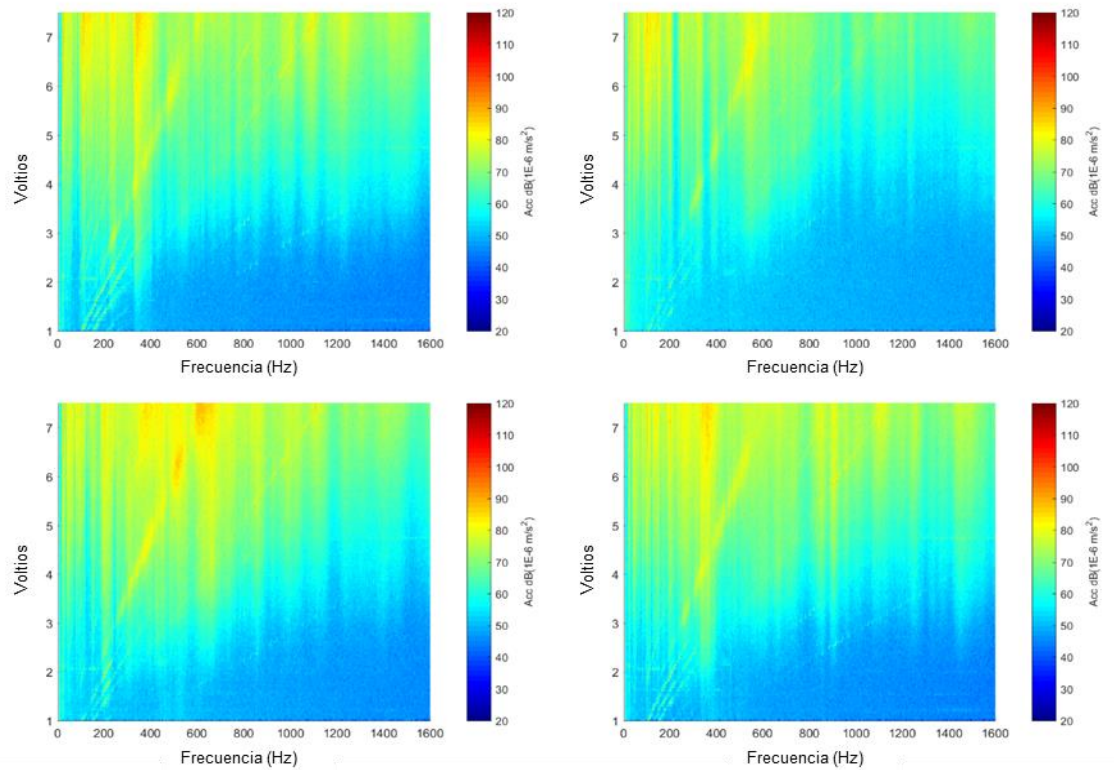
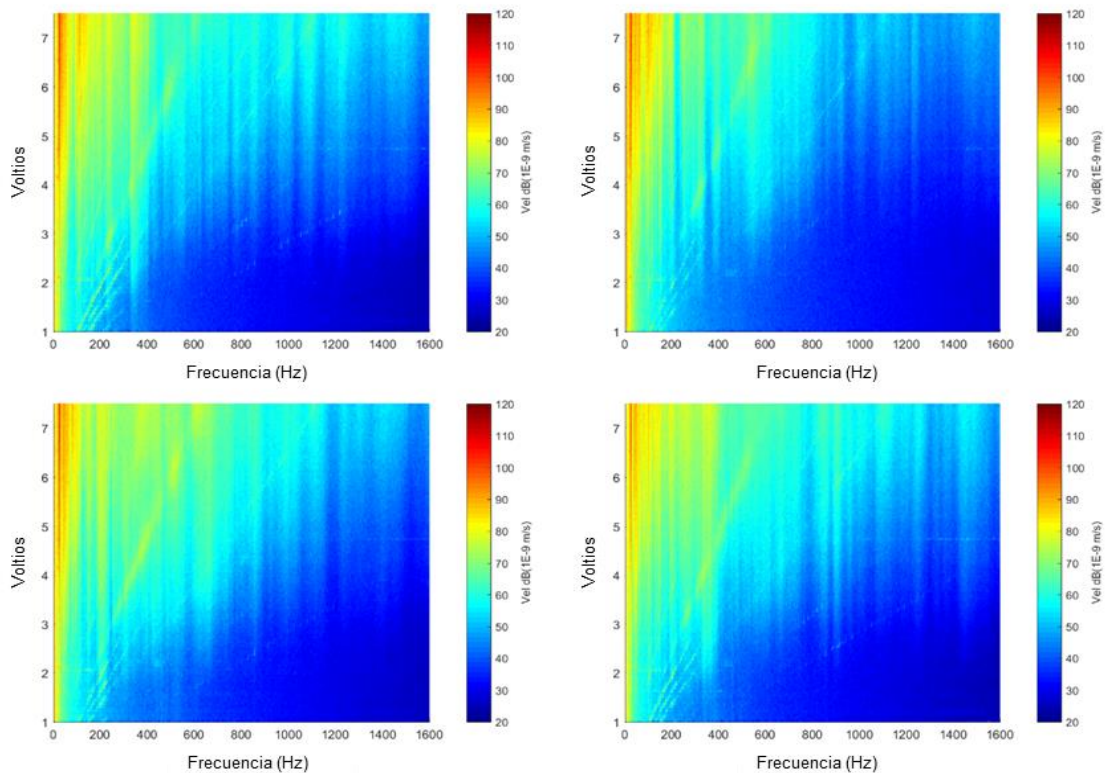


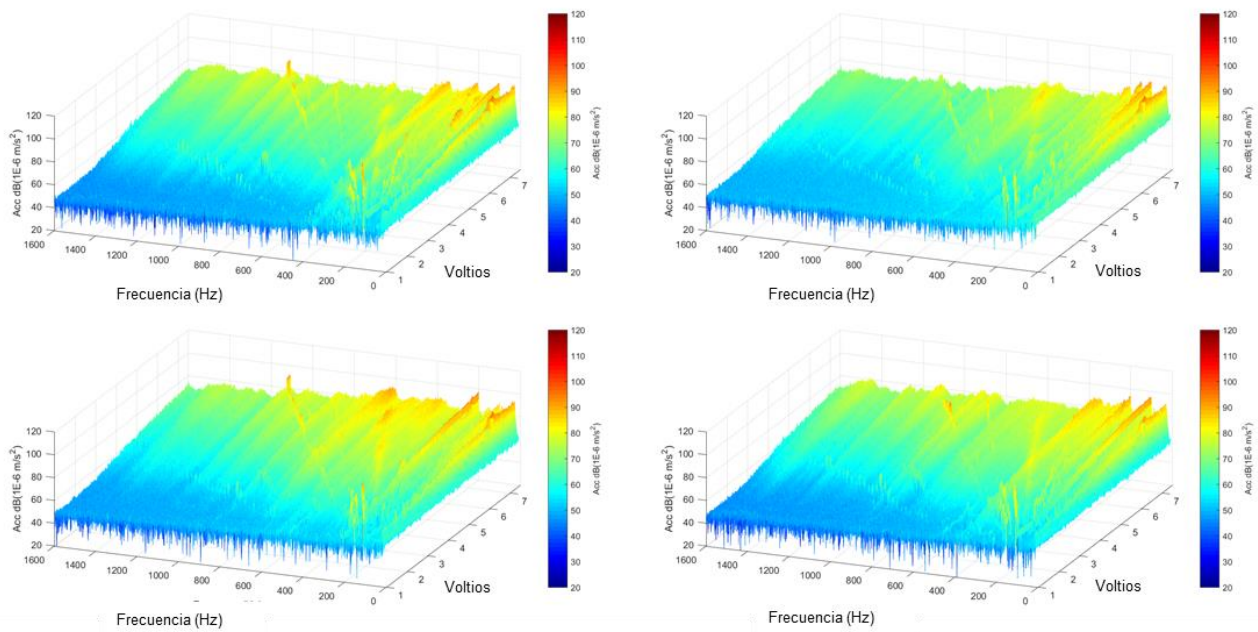
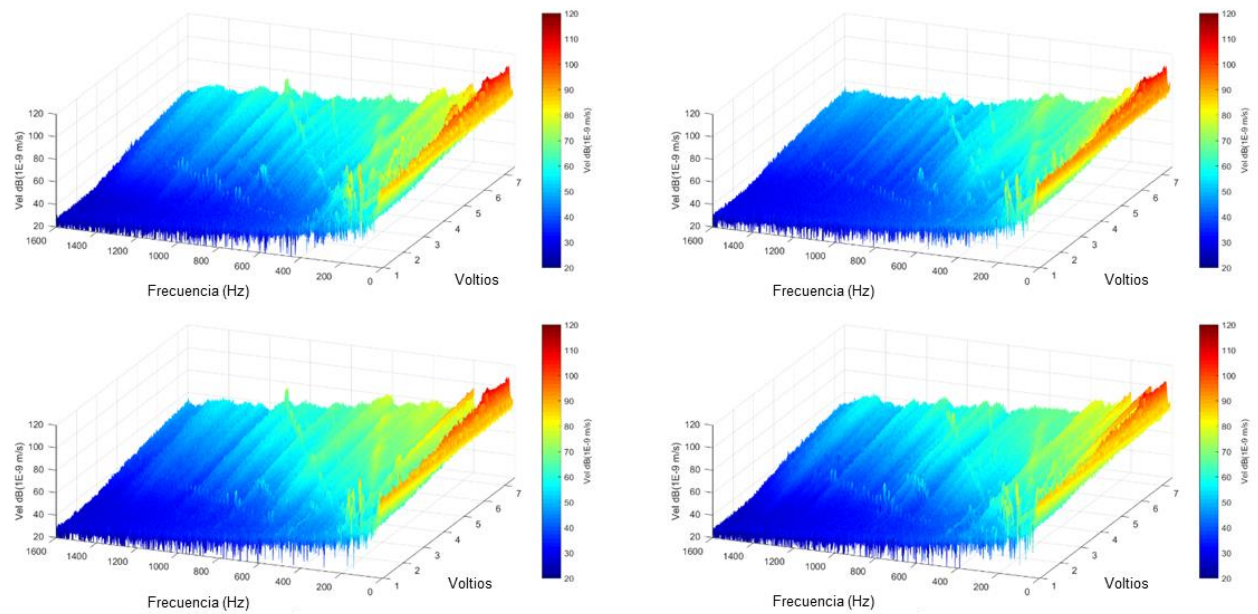
Figura 4.21: Velocidades de los niveles 1, 5 y *Booster* de la medida seleccionada

Una vez obtenidas estas gráficas queda exponer los *Waterfalls* en 2D y en 3D.

De los *Waterfalls* en 2D de aceleración cabe mencionar unos valores ligeramente mayores en los órdenes del acelerómetro 3, donde se puede observar en la parte superior de su imagen una zona anaranjada (Figura 4.22). Respecto a los *Waterfalls* en 2D de velocidad se observa una mayor variedad de color para el rango designado, siendo más claras las líneas oblicuas correspondientes a los órdenes de excitación. Los mayores valores se observan en los rangos de bajas frecuencias para voltajes altos. Además se puede apreciar claramente a qué voltaje y frecuencia surgen las resonancias estructurales del sistema, generadas en el cruce de los órdenes de magnitud con las frecuencias de excitación (ver Figura 4.23).

Sobre los *Waterfalls* en 3D de aceleración y en velocidad se observa más detalladamente los picos de las FFT y los órdenes de magnitud que sus homólogos en 2D.

Figura 4.22: *Waterfalls* 2D de aceleración de la medida seleccionadaFigura 4.23: *Waterfalls* 2D de velocidad de la medida seleccionada

Figura 4.24: *Waterfalls* 3D de aceleración de la medida seleccionadaFigura 4.25: *Waterfalls* 3D de velocidad de la medida seleccionada

5. Análisis de resultados

En este capítulo se explica detalladamente cómo ha sido el tratamiento de los resultados obtenidos, porqué se le otorga importancia al nivel de vibración *overall* y cuáles han sido las frecuencias relevantes en el estudio del sistema.

5.1 Nivel de vibración *overall*

El objetivo principal de la obtención de gráficas de vibración *overall* es el conocimiento de los niveles de vibración a los que están sometidos las diferentes partes del sistema a estudio y la reducción de éstos desde el foco emisor de vibración, el ventilador, hasta la zona del sistema en contacto con el usuario, el cristal vitrocerámico.

La gráfica más relevante en este caso es la de velocidad *overall*, puesto que en el rango de frecuencias en el que se trabaja, entre 10 y 1.000 Hz, la velocidad es el parámetro que más información nos da de la vibración del sistema, como se puede observar en la Figura 5.1.

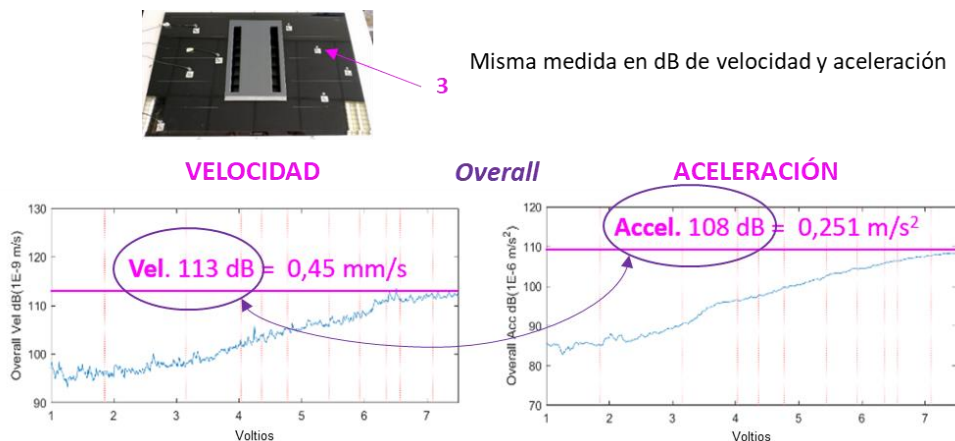


Figura 5.1: Comparación de velocidad y aceleración *overall* en un punto de medida

A continuación se procede a realizar un análisis de los resultados para las partes del sistema a estudio y cuál es la variación de los valores de velocidad entre cada una de ellas.

Se inicia la comparación entre los puntos correspondientes a la unión del ventilador con la voluta y la unión de la voluta con la carcasa. Como se puede observar en la Figura 5.2 los puntos de unión del

ventilador con la voluta poseen unos niveles máximos similares que varían de 120 a 122 dB, mientras que en los puntos de unión de la voluta con la carcasa se puede observar que también son similares, variando de 118 a 120 dB, pero cambian abruptamente entre los 6 y los 7 V (indicado con un círculo rojo), el equivalente a 1440 rpm. Se produce un decremento del 20,56% entre los valores de la primera unión y la segunda, expresados en mm/s (Ecuación 3.2).

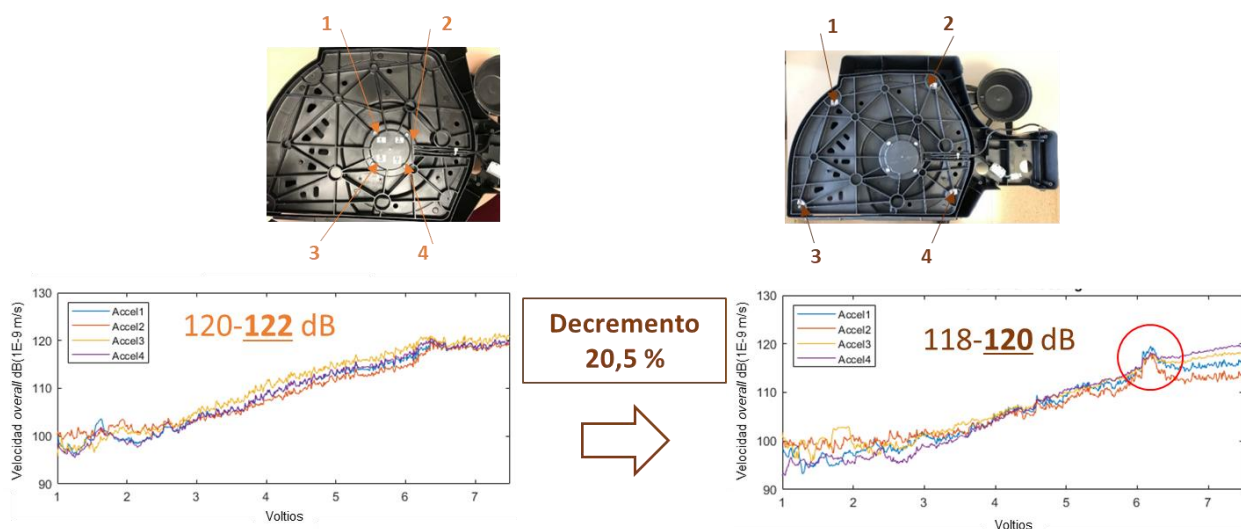


Figura 5.2: Comparación de velocidad *overall* de la unión ventilador – voluta con la unión voluta - carcasa

Debido a la geometría del sistema a estudio, no es posible la medición de vibración de los puntos pertenecientes a la unión de la carcasa con la placa interior. Posteriormente se procede a la comparación entre los puntos correspondientes a la unión de la voluta con la carcasa y los puntos de la unión de la placa interior con el cristal vitrocerámico.

En primer lugar se analizan los resultados obtenidos en la dirección Z en los puntos de la placa. Se pueden observar valores similares de 113 a 115 dB entre los puntos Z1 a Z9 y Z10 a Z12, no siendo así con los puntos Z7 a Z9, cuyos valores oscilan entre 116 y 117 dB. Esto se debe a la manera en la que está colocado el sistema: el mueble sobre el que está apoyado el sistema a estudio se ha fijado a la pared por el lado correspondiente a los puntos Z10 a Z12, y posee un hueco vacío (simulando un cajón) en el lado de los puntos Z7 a Z9, haciendo que éstos se encuentren en una situación “similar” a la que tendría una viga en voladizo. Resulta coherente razonar, por tanto, que los valores de velocidad de vibración *overall* serán mayores en estos puntos (Figura 5.3). Se produce un decremento de un 29,2% entre los valores de una unión y otra.

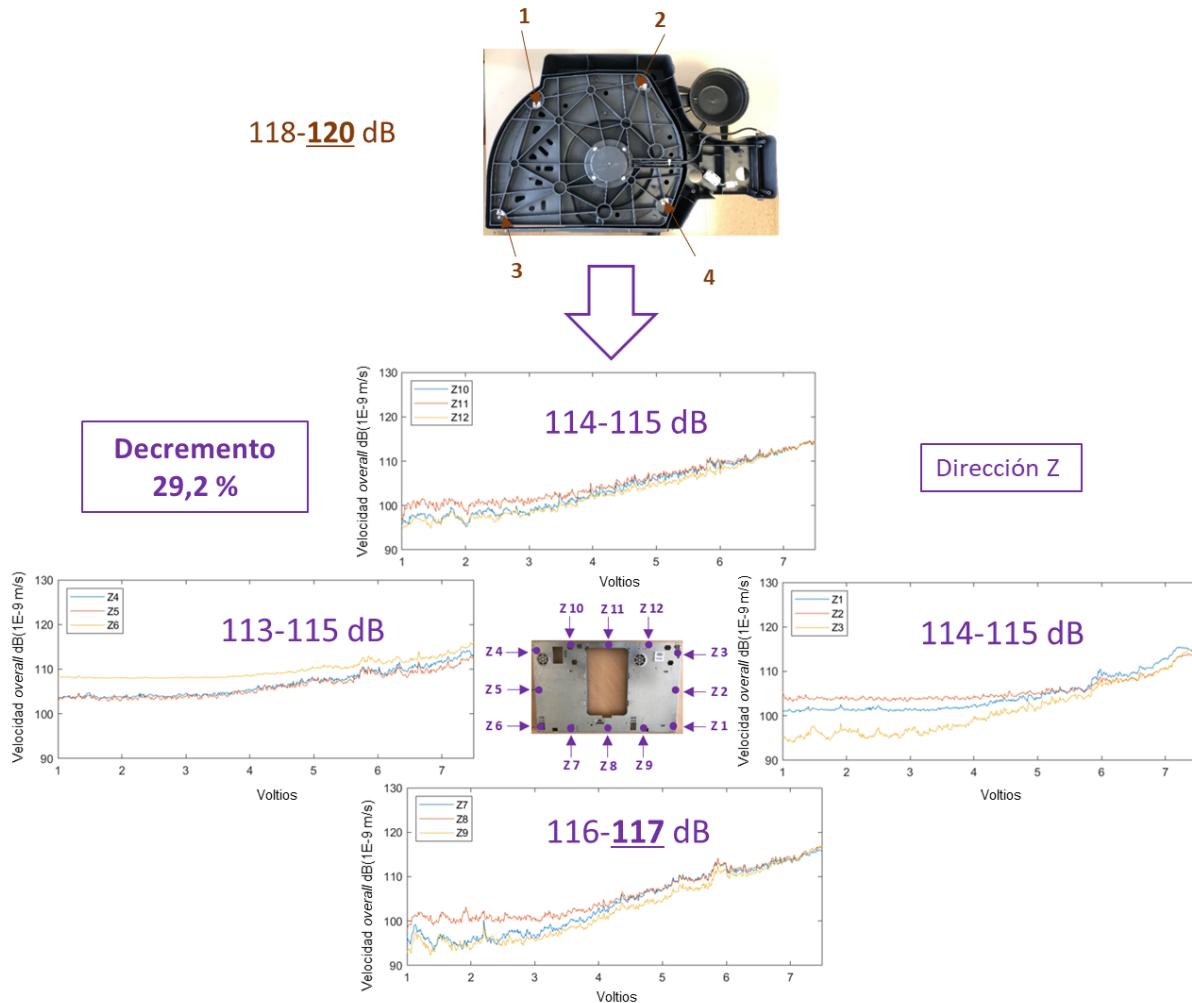


Figura 5.3: Comparación de velocidad *overall* de la unión voluta – carcasa con la unión placa interior – cristal en la dirección Z

En segundo lugar se analizan los puntos pertenecientes a las mismas uniones, en este caso en las direcciones X e Y. El mínimo de velocidad *overall* en ambas, 106 dB, se encuentra en la zona del panel táctil, con un nivel entre 6 y 7 dB menor que los niveles medidos en el resto de puntos. El máximo, 117 dB, se localiza en las uniones de la parte opuesta al panel táctil, originado a una velocidad muy alta del ventilador. Respecto a la dirección X, el lado izquierdo posee unos niveles de vibración mayores (115 dB) que el lado derecho. Se produce un decremento de un 43,7% en los niveles de vibración en dirección X y un 29,2% en los niveles en dirección Y (Figura 5.4). Se puede concluir que la distribución de la vibración a la que están sometidos los tornillos es bastante irregular. Los tornillos de la parte trasera sufren una velocidad de vibración 3,54 veces superior a la de los tornillos delanteros.

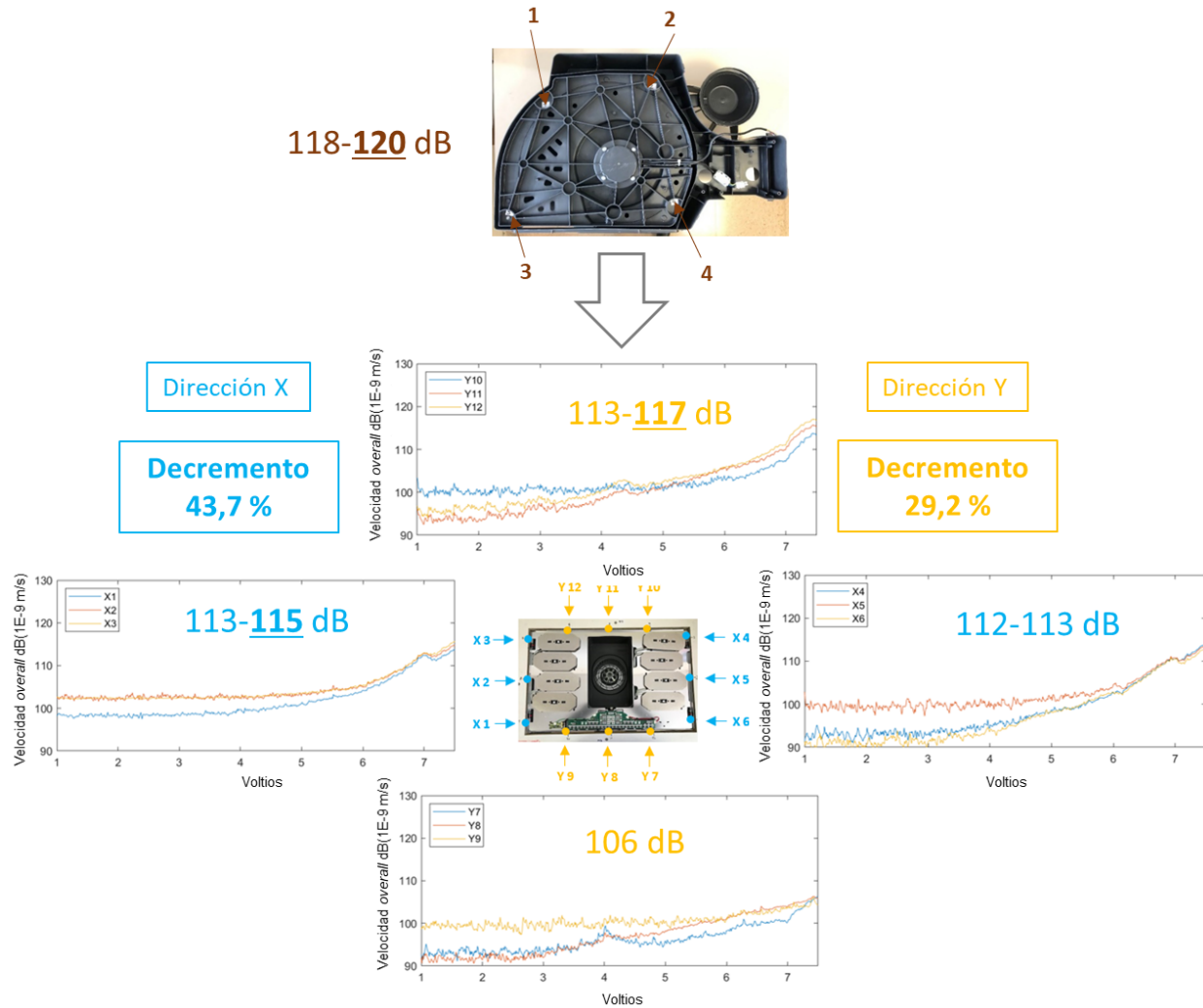


Figura 5.4: Comparación de velocidad *overall* de la unión voluta – carcasa con la unión placa interior – cristal en las direcciones X e Y

En siguiente lugar se analizan los ocho puntos colocados en el cristal vitrocerámico en dirección Z, cuatro de ellos en cada lado. El rango de velocidad de vibración es más estrecho en el lado izquierdo, localizándose el máximo nivel de todo el cristal, 116 dB a 1.440 rpm. Los valores máximos del lado derecho del cristal oscilan entre 110 y 115 dB. Se produce un decremento de un 10,8% en el lado izquierdo del cristal, y de un 20,5% en el lado derecho del cristal (Figura 5.5).

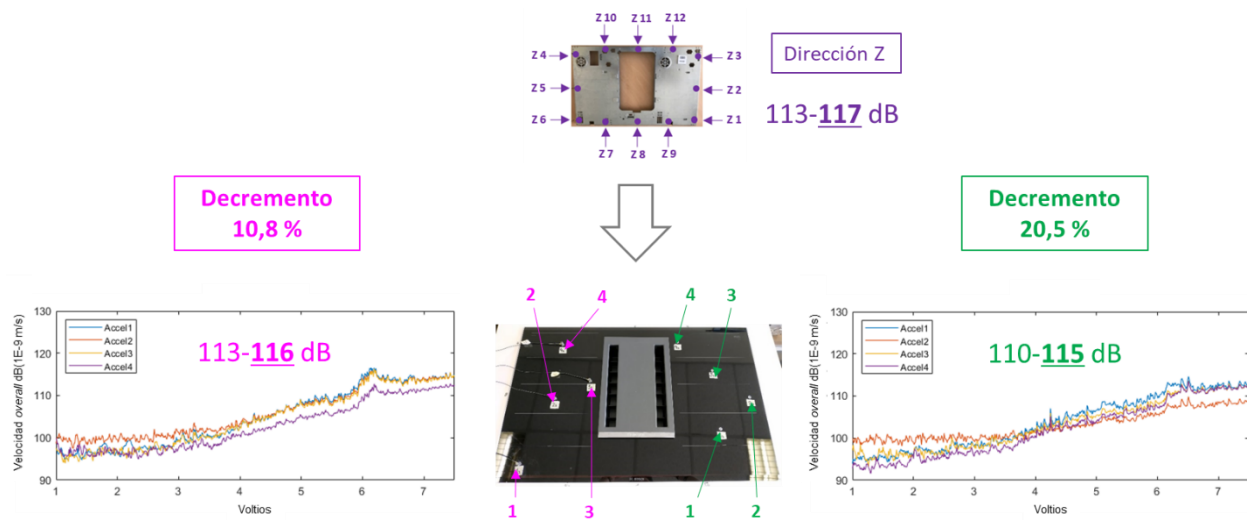


Figura 5.5: Comparación de velocidad *overall* de la unión placa interior – cristal con el cristal

Finalmente se comparan los puntos localizados en el cristal vitrocerámico con los localizados en el mueble. Los valores obtenidos en el mueble pertenecen a un rango similar en los puntos 1, 3 y 4, entre 105 y 107 dB. Sin embargo, en el punto 2, el nivel de vibración aumenta considerablemente respecto a los obtenidos anteriormente en el cristal, llegando hasta los 117 dB. Esto se debe a la geometría del sistema a estudio, explicada anteriormente. En los puntos 1, 3 y 4 se produce un decremento del 64,5%, mientras que en el punto 2 se produce un aumento del 12,2% (Figura 5.6).

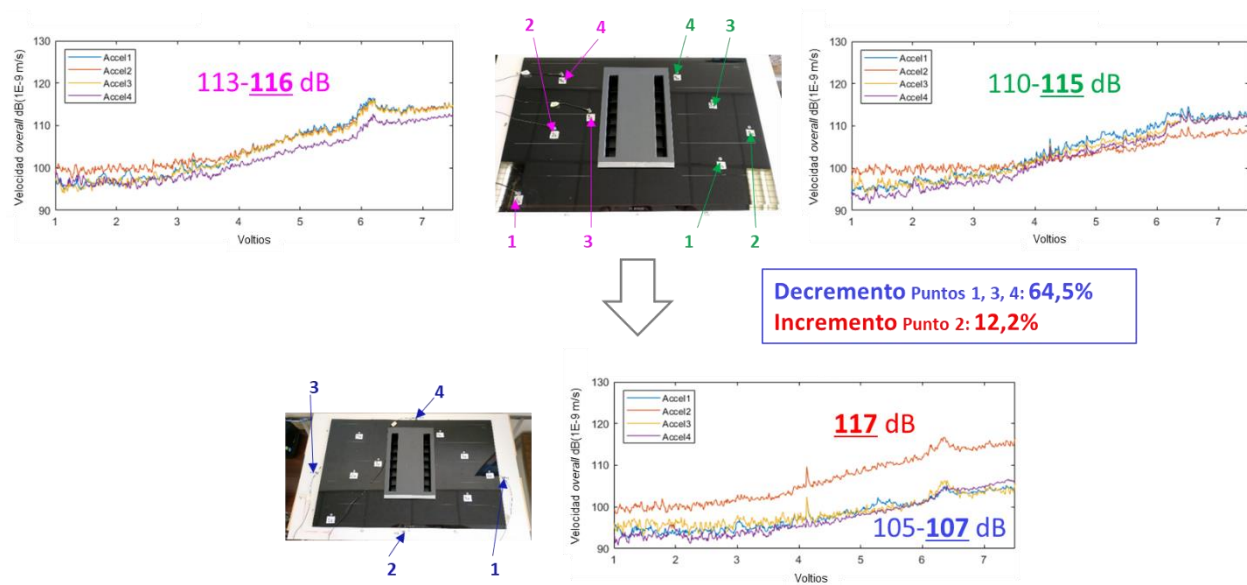


Figura 5.6: Comparación de velocidad *overall* del cristal con el mueble

A modo de resumen se muestra la Figura 5.7, en la que se encuentran las variaciones de niveles de velocidad de vibración *overall* entre los diferentes puntos del sistema a estudio, desde el ventilador hasta el cristal vitrocerámico y el mueble, pasando por la voluta, carcasa y placa interior. Existen decrementos de vibración entre todas las uniones del sistema entre un 20 y un 30%, además existe un decremento mayor entre el cristal y el mueble en 3 puntos de medida del 64.5%, y un incremento ligero entre el cristal y el mueble en el cuarto punto de medida.

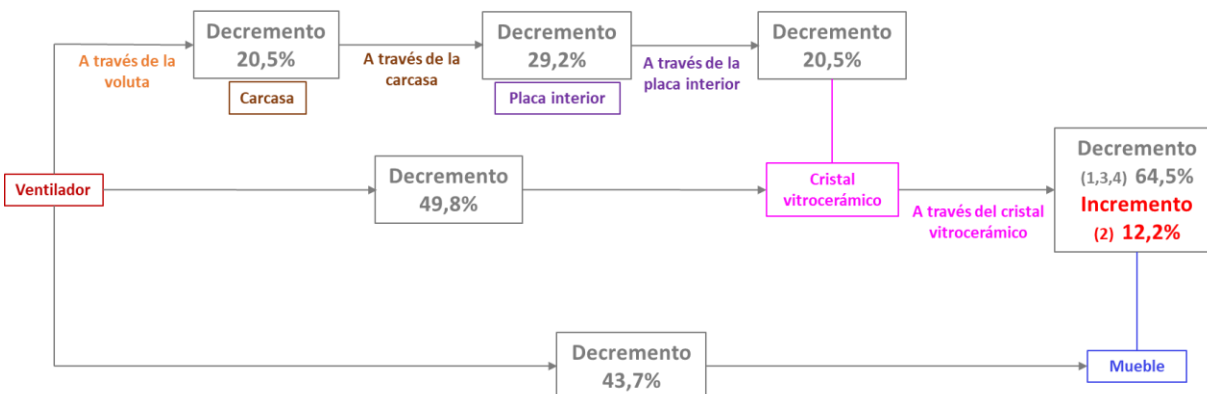


Figura 5.7: Variaciones del nivel de vibración entre los componentes del sistema a estudio

5.2 Frecuencias relevantes

Tras haber obtenido los valores de velocidad de vibración *overall* en cada punto, se procede a un análisis detallado de los niveles a diferentes frecuencias. Para ello, el primer paso consiste en la selección de las que se consideran relevantes para su estudio.

Se denominan “órdenes de excitación” al producto del número natural, n , por la velocidad de giro en rpm, expresado en Hz. Este concepto es similar al de los armónicos de una onda sonora. Las frecuencias relevantes corresponden a los órdenes 1x y 38x, ya que el ventilador tiene 38 palas. Además se han seleccionado las frecuencias principales resonantes del sistema a 26 y 45 Hz, y las frecuencias eléctricas: 100 y 200 Hz.

La Figura 5.8 muestra la evolución de los valores de velocidad de vibración para diferentes órdenes de excitación sobre todas las uniones del sistema, desde el ventilador hasta el mueble. El valor máximo de 113 dB se sitúa en la frecuencia correspondiente al orden 1x (~ 29.3 Hz) en la placa interior. La tendencia general es el decremento de los valores conforme se aleja del foco emisor de vibración, no siendo de esa manera en los órdenes 7x y 8x, en los que se aprecia un aumento de sus valores en el

cristal vitrocerámico. La mayor disminución se localiza entre el cristal vitrocerámico y el mueble. Cabe destacar que el nivel de vibración correspondiente al orden 1x aumenta un 123,8% al pasar de la carcasa a la placa interior, para disminuir posteriormente.

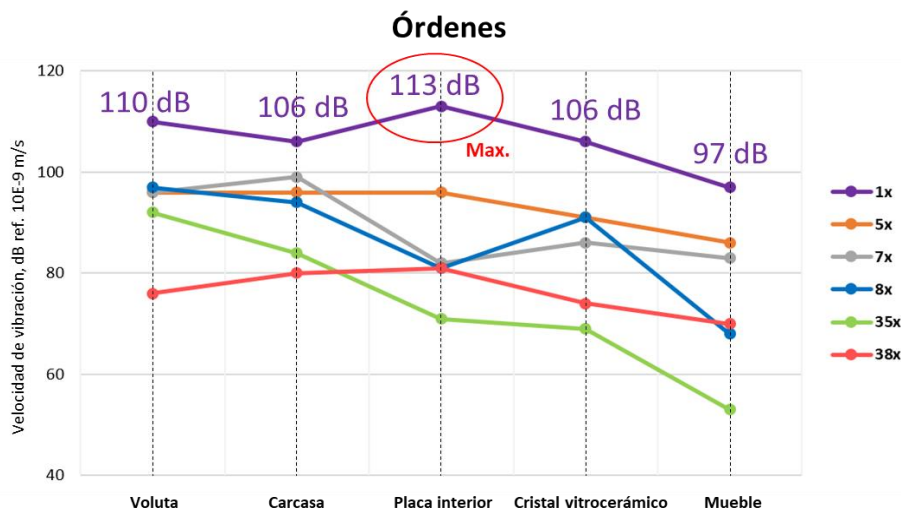


Figura 5.8: Velocidades de vibración para diferentes órdenes de excitación

Posteriormente se analizan los valores correspondientes a las frecuencias de resonancia del sistema a estudio: 26 y 45 Hz (Figura 5.9). Los niveles de vibración transmitidos desde el ventilador a través de la voluta hasta la carcasa se reducen un 55,3% a 26 Hz y un 84,1% a 45 Hz. No obstante, la vibración transmitida a través de la carcasa y la placa interior al cristal vitrocerámico aumenta en un 49,8% a 26 Hz y un 25,8% a 45 Hz. Finalmente, los niveles no se modifican entre el cristal y el mueble.

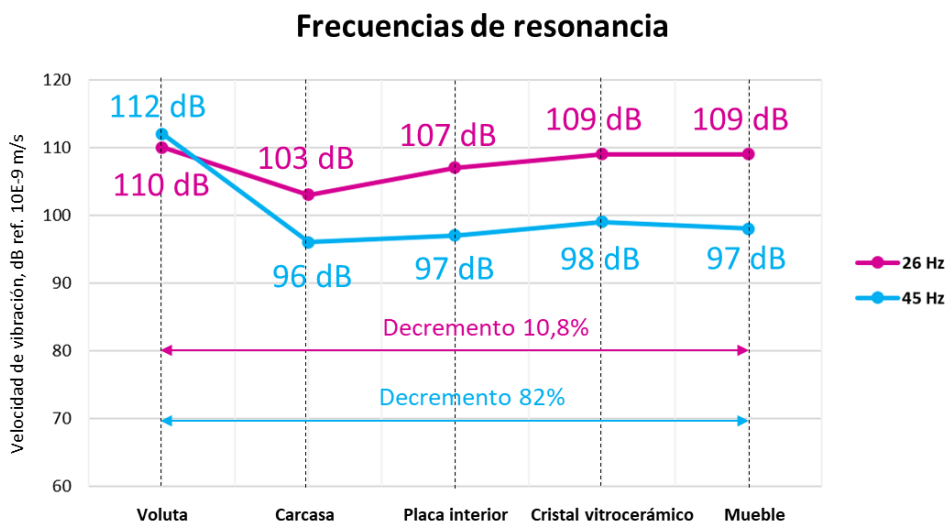


Figura 5.9: Velocidades de vibración para diferentes frecuencias de resonancia

En último lugar se analizan los niveles de vibración correspondientes a las frecuencias eléctricas: 100 y 200 Hz. La vibración transmitida por la voluta a la carcasa aumenta en un 181% a 100 Hz y un 50% a 200 Hz, alcanzando los niveles máximos de 116 dB y 104 dB, respectivamente. Posteriormente se reducen entre la carcasa y la placa interior en un 84% a 100 Hz y un 80% a 200 Hz. El nivel de vibración de la placa interior al mueble aumenta en un 58% a 200 Hz sin que el cristal vitrocerámico influya, mientras que a 100 Hz la placa interior no influye en el nivel respecto al cristal, pero sí que hay un decremento del 43,8% del cristal al mueble (Figura 5.10).

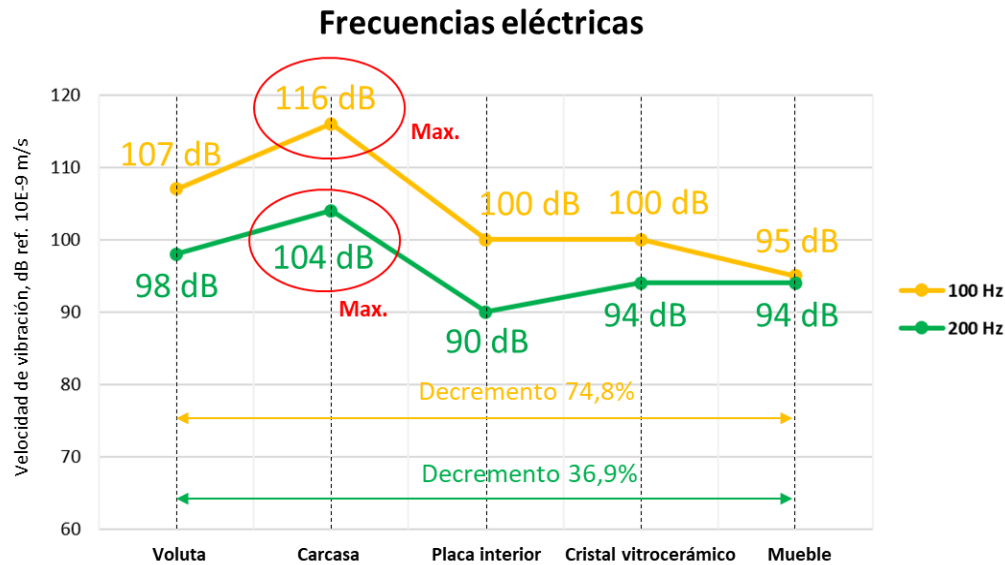


Figura 5.10: Velocidades de vibración para diferentes frecuencias eléctricas

Finalmente, y a modo de resumen, se incluyen en las Tablas 5.1 y 5.2 la variación en porcentaje de la vibración transmitida por los componentes del sistema a estudio y la influencia de los picos relevantes en la velocidad de vibración *overall*, respectivamente. Tal y como se ha explicado anteriormente, se producen grandes aumentos de la vibración en la voluta a 100 Hz (181,8%) y a 200 Hz (99,5%) y en la carcasa para el primer orden de excitación (123,8%) (Tabla 5.1). La última columna de la Tabla 5.2 muestra la contribución de las frecuencias consideradas relevantes a la velocidad máxima de vibración. Las mayores contribuciones, aproximadamente el 70% del total, corresponden a los tornillos de las uniones entre la voluta y la carcasa y a los puntos de unión entre la placa interior y el cristal vitrocerámico.

| Elementos que transmiten la vibración | Decremento / Aumento de la velocidad de vibración (%) | | | | | |
|---------------------------------------|---|-----------------------------|------------|------|-------|------|
| | Máximo overall | Frecuencias relevantes (Hz) | | | | |
| | | 26 | 30,72 (1x) | 45 | 100 | 200 |
| Voluta | 20,5 | 55,3 | 36,9 | 84,1 | 181,8 | 99,5 |
| Carcasa | 29,2 | 58,4 | 123,8 | 12,2 | 84 | 80 |
| Placa interior | 10,8 | 25,9 | 55,3 | 12,1 | 0 | 58,4 |
| Cristal | 12,2 | 0 | 64,5 | 10,8 | 43,6 | 0 |

Tabla 5.1: Variación de la vibración transmitida por los componentes del sistema a estudio

| Puntos de medida | Velocidad de vibración (dB ref. 10E-9 m/s) | | | | | | | |
|---------------------------|--|-----------------------------|-----|-----|-----|-----|-------|------|
| | Máximo overall | Frecuencias relevantes (Hz) | | | | | | |
| | | 26 | 1x | 45 | 100 | 200 | TOTAL | % |
| Unión ventilador – voluta | 122 | 110 | 110 | 112 | 107 | 98 | 116,2 | 51,3 |
| Unión voluta – carcasa | 120 | 103 | 106 | 96 | 116 | 104 | 116,9 | 70 |
| Placa interior | 117 | 107 | 113 | 97 | 100 | 90 | 114,2 | 72,4 |
| Cristal | 116 | 109 | 106 | 98 | 100 | 94 | 116 | 58,8 |
| Mueble | 117 | 109 | 97 | 97 | 94 | 94 | 117 | 43,6 |

Tabla 5.2: Influencia de los picos relevantes en la velocidad máxima de vibración

6. Influencia de los inductores y la electrónica en la transmisión de vibraciones

Este capítulo proporciona información sobre la influencia que tienen los inductores y el conjunto de la electrónica del sistema a estudio en la transmisión de vibraciones desde el ventilador hasta la parte superior formada por el cristal vitrocerámico y el mueble.

El objetivo de este capítulo es conocer qué nivel de amortiguamiento de la vibración del cristal y del mueble es debido a los inductores y la electrónica. Para ello es necesaria la realización de una serie de medidas con la electrónica incorporada y sin ella para su posterior comparación y análisis de resultados. El parámetro elegido para el estudio es la velocidad de vibración *overall*, (al igual que en el capítulo 5) ya que se obtiene una gran cantidad de información. En la Figura 6.1 se pueden observar los puntos de medida utilizados en este estudio.

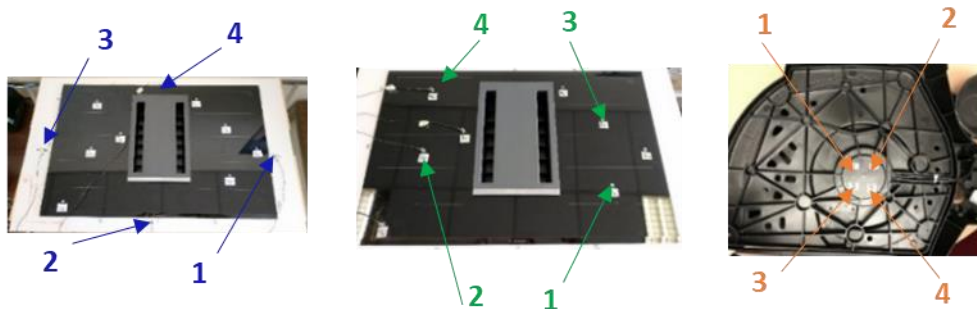


Figura 6.1: Puntos de medida del mueble, cristal y voluta

Tal y como se ha comentado en el apartado 5.1, el nivel máximo de velocidad de vibración de los puntos pertenecientes a la unión del ventilador con la voluta se sitúa en el rango de 120 a 122 dB, a una velocidad aproximada del ventilador de 1.440 rpm. Estos valores son similares a los que se obtienen en las mediciones sin electrónica, por lo que se considerarán iguales en el estudio.

Posteriormente se realizan las medidas en los puntos indicados en el cristal vitrocerámico y en el mueble, con y sin electrónica. Tras haber obtenido los resultados y las gráficas correspondientes al proceso de medida, las conclusiones obtenidas son las siguientes:

- El rango de niveles de vibración del cristal vitrocerámico con los inductores ni la electrónica se localiza entre 117 y 122 dB, mientras que con la electrónica se halla entre 113 y 116 dB. Esto supone un decremento de la velocidad de vibración de un 49,8 % debido a los inductores y la electrónica, calculado con los valores en mm/s.
- Respecto al mueble, el rango de valores de la velocidad de vibración de los puntos 1, 3 y 4 sin la electrónica se localiza entre 107 y 110 dB; en el punto 2 el valor máximo alcanza los 124 dB. No obstante, si se colocan los inductores y la electrónica, el rango de valores para los puntos 1, 3 y 4 se sitúa entre los 105 y 107 dB, mientras que para el punto 2 el valor máximo es de 117 dB. El hecho de colocar el conjunto de la electrónica influye positivamente en los valores de la velocidad de vibración, proporcionando un decremento del 29% en el caso de los puntos 1,3 y 4, y del 55 % en el caso del punto 2.

En siguiente lugar se proceden a analizar las frecuencias relevantes del sistema, que serán las mismas que las mencionadas en el apartado 5.2. Se componen de las frecuencias correspondientes a los órdenes de excitación seleccionados, frecuencias de resonancia del sistema y frecuencias eléctricas.

Primeramente se obtienen los resultados pertenecientes a los órdenes de excitación del sistema a estudio. En este caso se ha decidido incluir en la Figura 6.2 varios órdenes adicionales a los relevantes para poder compararlos con los principales. Se puede observar que a la frecuencia perteneciente al orden 1x, los inductores y la electrónica reducen el nivel de velocidad de vibración en un 75% aproximadamente, mientras que en el mueble lo reducen un 93%.

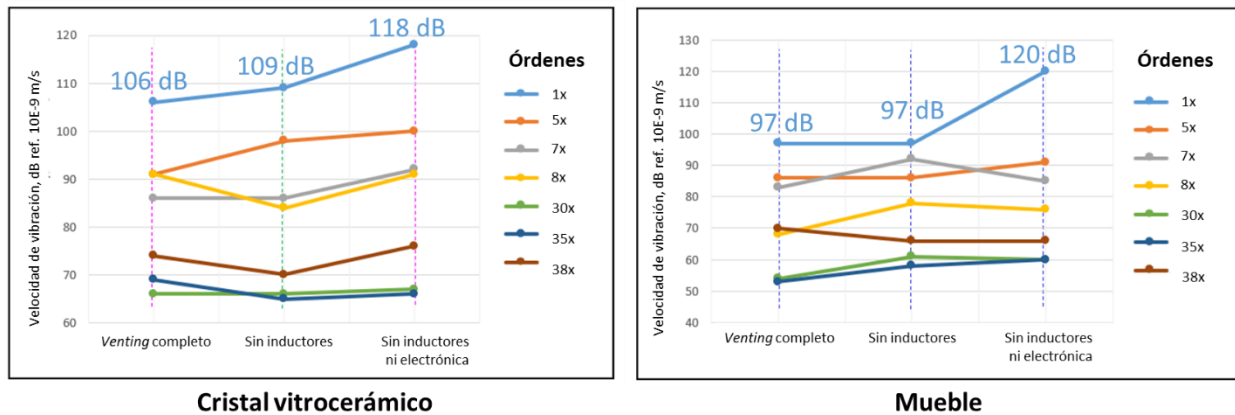


Figura 6.2: Velocidades de vibración para diferentes órdenes con y sin electrónica

En segundo lugar se analizan los resultados que corresponden a los picos de resonancia del sistema: 26 y 45 Hz. Los inductores y la electrónica provocan un incremento de los valores de velocidad de vibración del sistema tanto en el cristal vitrocerámico como en el mueble, en un 124% y 77,9% para

26 Hz de frecuencia, y en un 12% y 58,4% para 45 Hz de frecuencia respectivamente. Se incluye además una frecuencia de resonancia elevada en comparación con las dos principales para comparar sus valores (Figura 6.3).

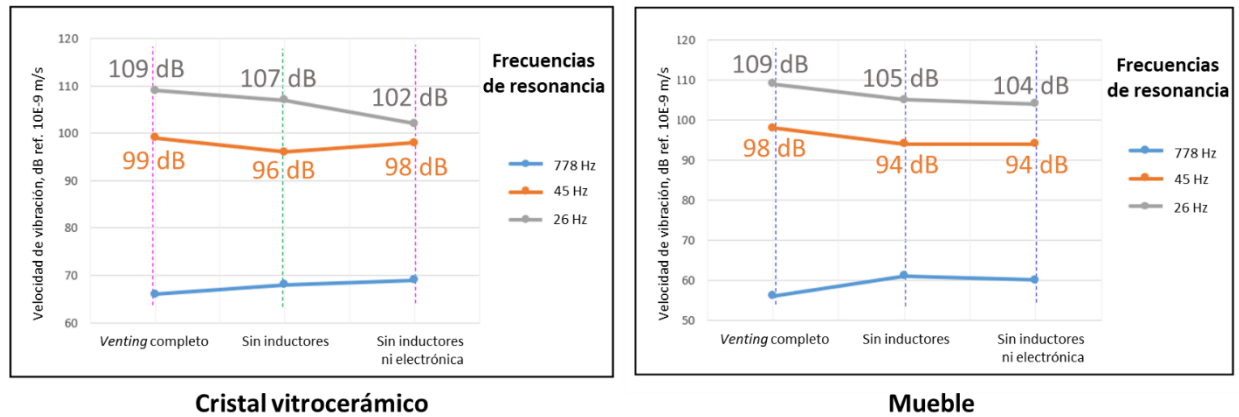


Figura 6.3: Velocidades de vibración para los picos de resonancia con y sin electrónica

En último lugar se analizan los valores obtenidos de las frecuencias eléctricas: 100 y 200 Hz. A 100 Hz, el conjunto de inductores y electrónica producen un decremento de la velocidad de vibración en el cristal vitrocerámico de un 43,8% aproximadamente, mientras que en el mueble la reducción es del 77,7%. A 200 Hz el decremento que se produce en el cristal vitrocerámico con el conjunto de la electrónica es del 36,9%, sin embargo se produce un aumento del nivel de vibración en el mueble de un 41,5% (Figura 6.4).

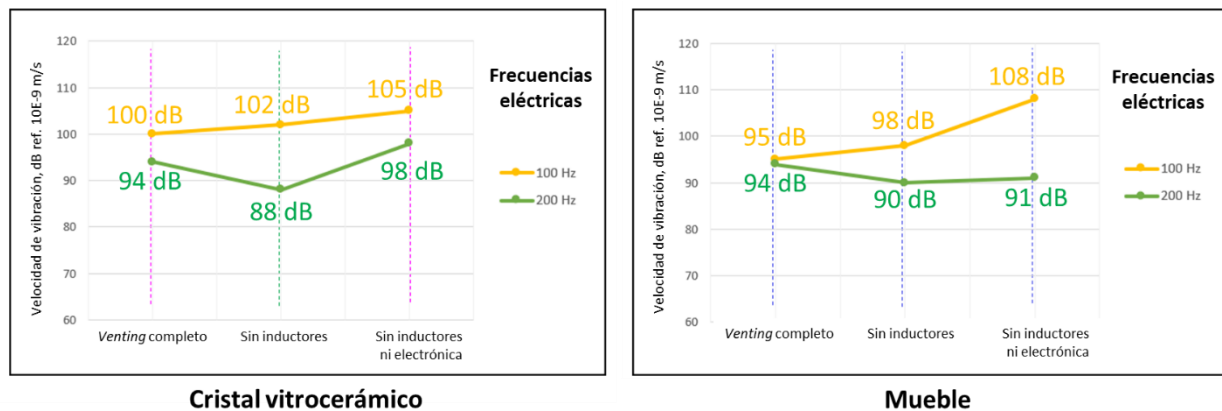


Figura 6.4: Velocidades de vibración para las frecuencias eléctricas con y sin electrónica

7. Estudio de las vibraciones transmitidas a los componentes electrónicos

Este capítulo proporciona información sobre los niveles de velocidad de vibración transmitidos a los principales componentes electrónicos del sistema a estudio. Resulta importante el conocimiento de estos niveles ya que en situaciones límite podrían provocar fallos por fatiga o mal funcionamiento.

Para ello es necesario realizar una serie de medidas experimentales, colocando los acelerómetros en aquellos componentes susceptibles de fallo. Además, se debe tener en cuenta la geometría de la electrónica, ya que en muchos casos resulta difícil o directamente imposible colocar los acelerómetros en los lugares deseados. Se eligen tres puntos de medida en cada placa de electrónica: uno en el refrigerador, otro en la propia placa electrónica y el último en el relé (Figura 7.1). Los resultados obtenidos de estos puntos se compararán con un punto perteneciente a la unión del ventilador con la voluta, ya que es esta unión la que nos ofrece los resultados con los picos más claros. El parámetro elegido para la comparación es la velocidad de vibración *overall*, elegida anteriormente puesto que ofrece una mayor cantidad de información. De él se obtendrán las variaciones de velocidad en comparación con el punto de referencia. Más adelante se incluyen gráficas de las FFT de velocidad obtenidas a potencia *Booster* (1.760 rpm).

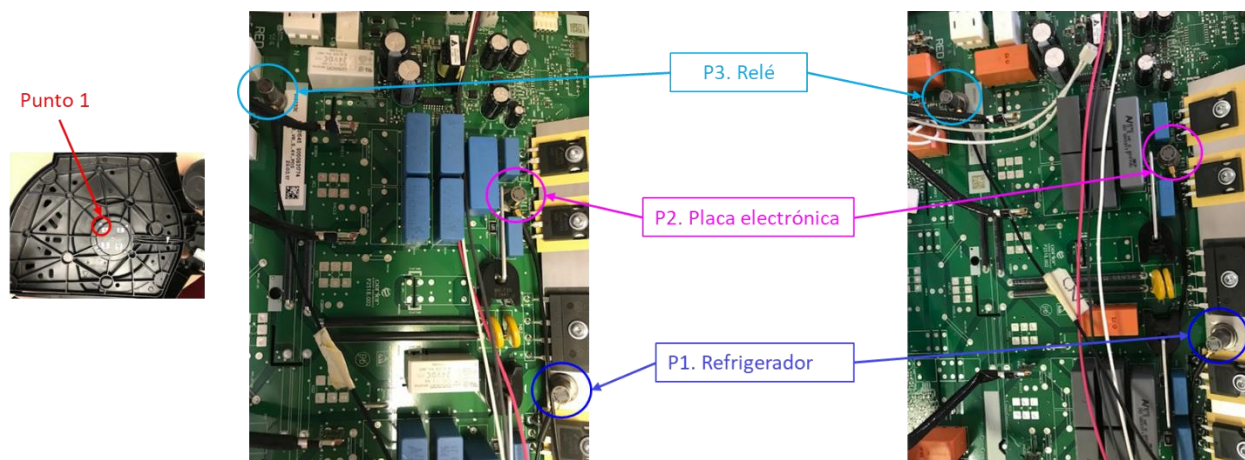


Figura 7.1: Puntos de medida de la electrónica

Tras varias tomas de medidas y el posterior tratamiento de datos se obtiene un nivel máximo de velocidad de vibración del punto 1 de 121 dB. En los puntos 2, 3 y 4 del lado izquierdo de la placa se obtienen unos niveles máximos de vibración de 117 dB, 120 dB y 117 dB respectivamente. Esto supone un decremento en los valores de un 42%, 18% y 42%. De la misma manera, en los puntos 2, 3 y 4 pertenecientes al lado derecho de la placa se obtienen valores de vibración *overall* máximos de 116 dB, 118 dB y 113 dB. Esto supone una disminución respecto al punto 1 de un 44%, 29% y 60% respectivamente.

En siguiente lugar se procede a la obtención de las gráficas FFT de velocidad para cada punto. Se decide extraer unos rangos determinados de frecuencia (de 10 a 300 Hz y de 740 a 1.200 Hz) para poder visualizar mejor los picos de los resultados relevantes. Además se decide colocar en las gráficas líneas verticales indicando la frecuencia a la que le corresponde cada orden de excitación. En bastantes casos los picos de las gráficas coinciden con estas líneas verticales.

En las gráficas correspondientes al lado izquierdo se pueden observar picos muy marcados en la frecuencia eléctrica de 100 Hz, y menos pronunciado en la siguiente, 200 Hz. Posteriormente se pueden observar picos marcados en la frecuencia correspondiente al orden de excitación 38x para los puntos 1, 2 y 3, no siendo así para el punto 4. Finalmente los valores de los puntos 2, 3 y 4 disminuyen progresivamente a partir de los 1130 Hz (Figura 7.2).

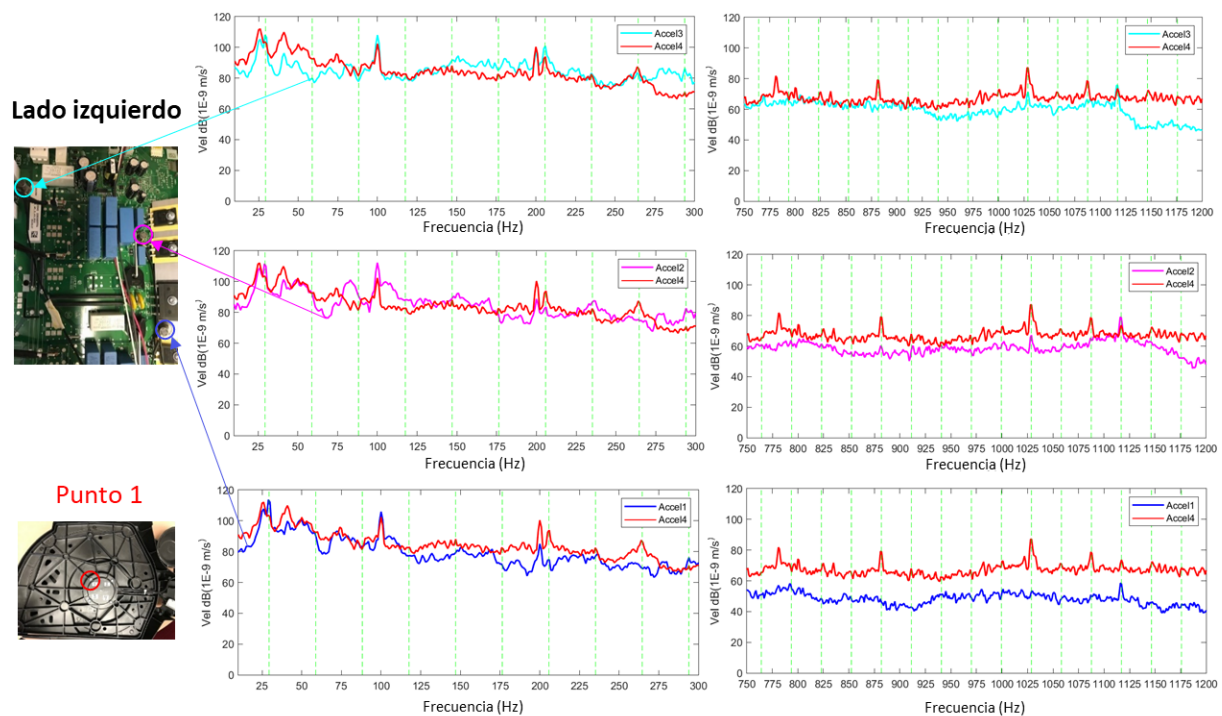


Figura 7.2: Gráficas FFT del lado izquierdo de la electrónica

En las gráficas correspondientes el lado derecho se puede observar una menor pronunciación de los picos en comparación con el lado izquierdo. En el punto 1 no se marca la frecuencia eléctrica de 100 Hz. En los tres puntos de medida se aprecia notablemente la frecuencia eléctrica de 200 Hz. Cabe destacar que en los tres puntos de la electrónica se aprecia un pico a la frecuencia de 1.115 Hz.

Posteriormente los valores de velocidad en el punto 3 disminuyen, no siendo así con los puntos 1 y 2 donde se mantiene constante o incluso aumenta (Figura 7.3).



Figura 7.3: Gráficas FFT del lado derecho de la electrónica

8. Mapa de vibración global del cristal vitrocerámico

En este capítulo se explica otro procedimiento de medida que se ha realizado en el trabajo. Se trata de un mapa que indica los niveles de vibración presentes en el cristal vitrocerámico para diferentes frecuencias de excitación.⁴

8.1 Metodología de medida

Un mapa de vibración consiste en una imagen en la que se representan los valores de vibración de todos los puntos de medida del cristal vitrocerámico mediante un código de colores expresado en la leyenda de la propia imagen. Este tipo de mapas proporciona información de las áreas del sistema que están sometidas a mayores valores de vibración.

Para ello se seleccionan 60 puntos de medida a cada lado del cristal, en los que se colocan arandelas para poder adherir los acelerómetros a ellos (Figura 8.1). Los puntos se encuentran separados entre sí 5 cm longitudinalmente y 5,25 cm transversalmente, creando dos rectángulos de dimensiones 30 x 52,5 cm. Todas las medidas que se llevan a cabo se realizan a la velocidad *Booster* del ventilador (1760 rpm).

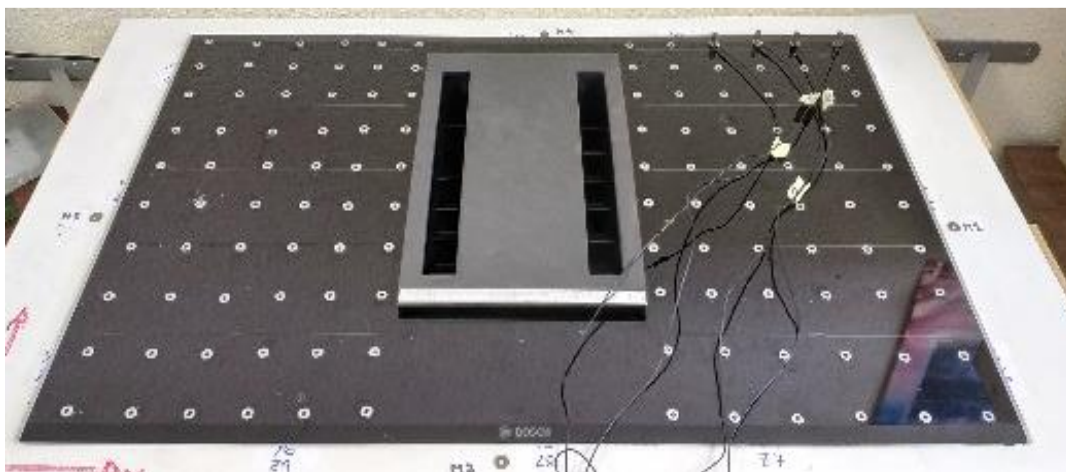


Figura 8.1: Puntos de medida del mapa de vibración

⁴ Para más representaciones de los mapas de vibración, acudir al Anexo IV

Del analizador se obtiene una FFT de cada punto de medida instantáneamente desde 1 Hz hasta 1.600 Hz, con un ancho de banda de 1 Hz. Tras estabilizarse el sistema a velocidad *Booster*, se colocan 4 acelerómetros en 4 puntos de medida. Se espera entre 5 y 15 segundos a que la señal de salida se estabilice y se guarda la medida realizada una vez se observa que no varía. Se realiza el mismo procedimiento para los 120 puntos de medida de los dos rectángulos. Directamente desde el programa de medida se puede variar si obtener velocidad o aceleración y las unidades de cada una de ellas. Se puede observar en la Figura 8.2 un pico muy claro a 100 Hz correspondiente al primer armónico de la frecuencia eléctrica, así como otro pico en 1.150 Hz aproximadamente, correspondiente al orden 38.

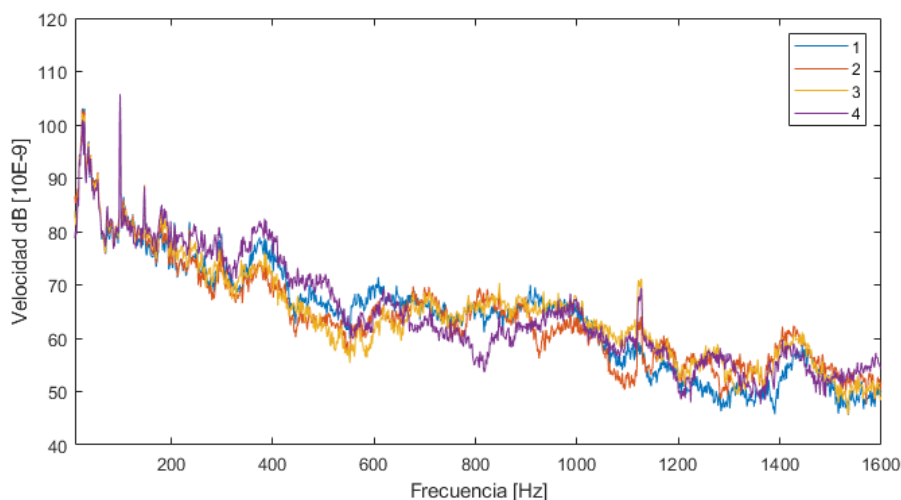


Figura 8.2: FFT de 4 puntos de medida

8.2 Tratamiento de resultados

Tras haber obtenido las FFT se crea un programa en entorno MATLAB que cree los mapas necesarios. Para cada punto de medida se crea un vector que almacena los valores de la FFT en función de la frecuencia (de 1 a 1.600 Hz). Posteriormente se extrae el valor de la FFT a la frecuencia deseada del vector de cada punto, y elabora una matriz con los 60 puntos de medida de cada rectángulo. En siguiente lugar, se “suaviza” dicha matriz introduciendo unos coeficientes de ponderación para el punto medida y los puntos adyacentes a éste (Figura 8.3). En los resultados de un punto interior influirán los ocho puntos colocados a su alrededor (en mayor medida los cuatro puntos más cercanos y en menor medida los otros cuatro diagonales), en un punto de un lateral influirán los cinco de su alrededor y en un vértice los tres adyacentes. Finalmente se crea la imagen y se asigna una escala de color entre dos valores preseleccionados, obteniendo las Figuras 8.4 y 8.5.

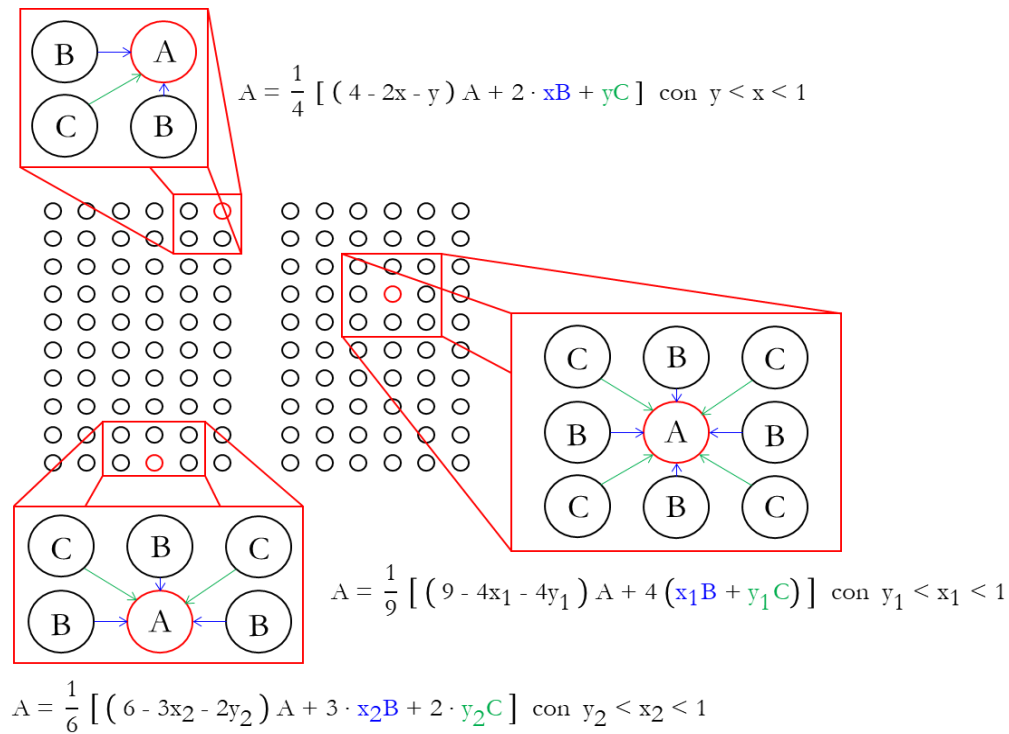
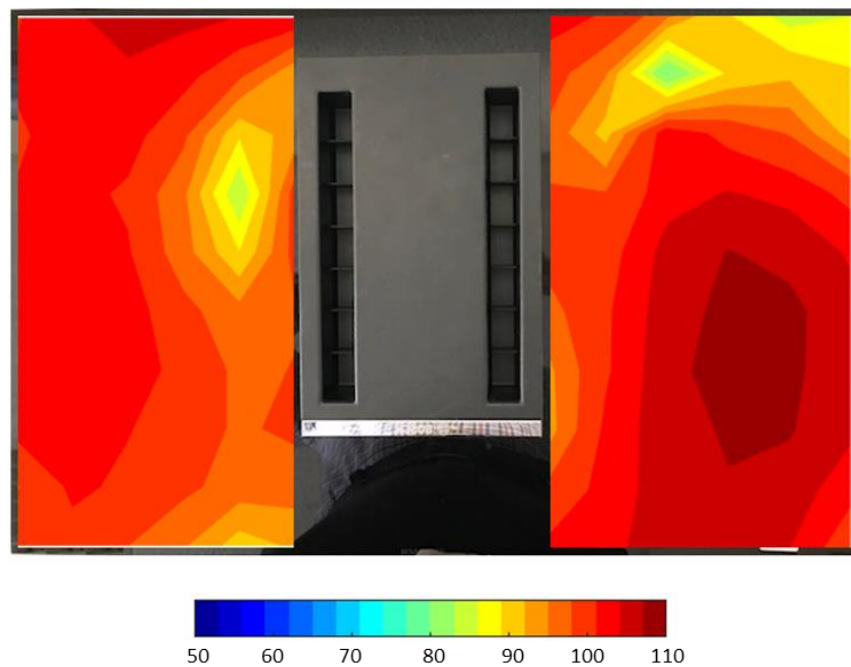
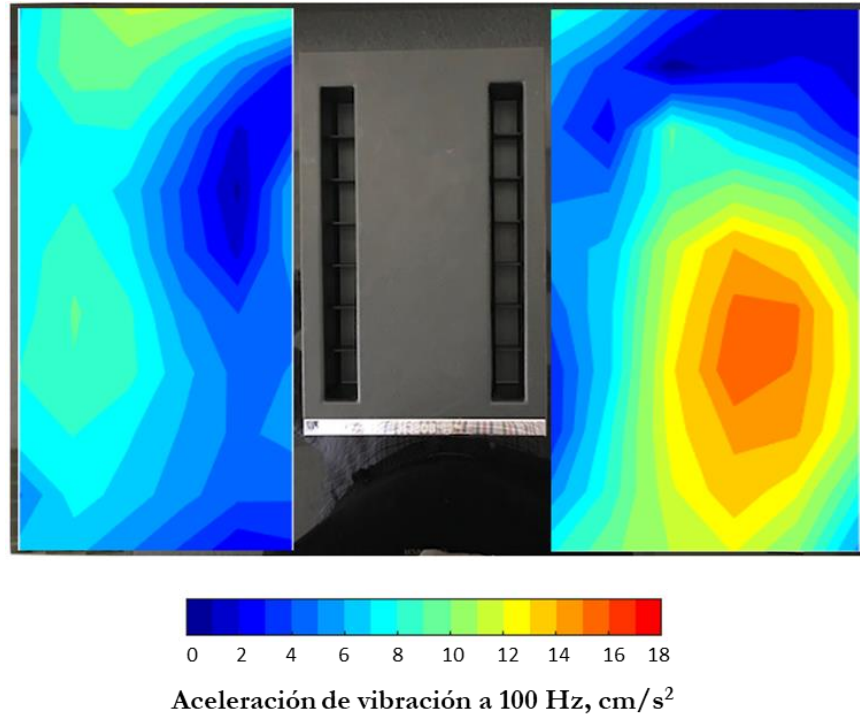


Figura 8.3: Esquema del proceso de “suavizado” de la matriz

Velocidad de vibración a 100 Hz (dB ref. 10^{-9} m/s)Figura 8.4: Mapa de velocidad de vibración, en dB ref. 10^{-9} m/s

Figura 8.4: Mapa de aceleración de vibración, en cm/s²

9. Conclusiones. Trabajo futuro

Este capítulo proporciona información sobre las conclusiones obtenidas tras el estudio y análisis de los resultados de diversas tomas de medidas para conocer las vibraciones transmitidas del ventilador a todo el sistema, así como la aplicación tanto de esta metodología como del análisis realizado a nuevas cocinas con el sistema *venting* incorporado.

En primer lugar, el desarrollo e implementación de los programas informáticos permite su aplicación en cualquier sistema *venting* del que se desee conocer su respuesta sometido a una excitación vibratoria. Además, el hecho de haber desarrollado y realizado las diversas tomas de medidas otorga soltura y práctica en este ámbito, permitiendo así una adaptación más rápida al análisis de un sistema *venting* diferente al estudiado.

Por otra parte, este trabajo ha permitido al alumno la adquisición de conocimientos que no se imparten en el grado al que pertenece. Investigando y aprendiendo sobre todo el campo de vibraciones, análisis modal, toma de medidas con acelerómetros y sus respectivos programas, así como transmisión y medición de ruido.

A su vez, este trabajo se ha realizado bajo la supervisión de la empresa B/S/H/ GmbH, realizando reuniones periódicas para la exposición de resultados. Esto ha supuesto una toma de contacto para el alumno con la empresa, familiarizándolo con el ámbito laboral.

Finalmente, al haber realizado la investigación mientras el alumno llevaba a cabo sus estudios, este trabajo ha mejorado la gestión de su tiempo y la realización simultánea de diversas tareas, finalizándolas satisfactoriamente.

Bibliografía

- Avitabile, P. (2019). Experimental Modal Analysis. Sound & Vibration Magazine, 1-3.
- Beranek, L. L. (1992). En L. L. Beranek, Noise and vibration control engineering: principles and applications (pp. 579-609). Wiley.
- Blekhman, I. I. (2000). En I. I. Blekhman, Vibrational Mechanics: Nonlinear Dynamic Effects, General Approach, Applications (págs. 1-21). World Scientific.
- BOSCH. (2019). Obtenido de Serie | 8 Kochfeld mit Dunstabzug (Induktion) 80 cm: <https://www.bosch-home.com/de/produktliste/PXX875D34E#/>
- Brüel & Kjær. (1982). Measuring Vibration.
- Brüel & Kjær. (1999). Obtenido de Principios de Análisis Espectral: <https://www.bksv.com/es-ES/Knowledge-center>
- Brüel & Kjær. (2018). Product Data. DeltaTron® Range. Brüel & Kjær.
- Brüel & Kjær. (s.f.). Obtenido de Instrumentos para medir vibraciones: <https://www.bksv.com/es-ES/Knowledge-center>
- Brüel & Kjær. (s.f.). Obtenido de Introducción a las vibraciones: <https://www.bksv.com/es-ES/Knowledge-center>
- Ebmpapst. (2004). Axial fan: W3G300-CN02-32. Obtenido de <https://www.ebmpapst.com/en/products/axial-fans/axialfansdetail.php?pID=162355>
- Ewins, D. J. (1984). En D. J. Ewins, Modal Testing: Theory and Practise (pp. 1-24). London: Wiley.
- French, A. P. (1974). En A. P. French, Vibraciones y ondas (págs. 183-225). Reverte.
- Harvey, M. C. (2000). The fundamentals of FFT-based signal analysis and measurement. National Instruments.
- Jenn-Air. (2016). Obtenido de Euro-style 36" induction downdraft cooktop JID4436ES: <http://v1.jennair.com/appliances/details/JID4436ES>
- Juan Lladó, B. S. (s.f.). Vibraciones y Ruido en Máquinas. Zaragoza, España.

- Magnetic Cooky. (2020). Obtenido de Is there any induction cooktop with downdraft vent incorporated?: <https://www.magneticcooky.com/induction-cooktop-with-downdraft/>
- Martínez, M. H. (2010). En M. H. Martínez, Teoría de vibraciones (pp. 320-372). Servicio de Publicaciones de la Universidad de Córdoba.
- Miele. (2019). Placa de inducción con extracción integrada. Obtenido de <https://www.miele.es/electrodomesticos/induktionskochfelder-mit-integriertem-wrasenabzug-5459.htm>
- Miller, R. (2019). How good is a cooktop downdraft ventilation system? Obtenido de SFGate: <https://homeguides.sfgate.com/good-cooktop-downdraft-ventilation-system-94822.html>
- Moliner, P. R. (1980). En P. R. Moliner, Vibraciones (págs. 113-128). ETSEIB.
- National Instruments. (2020). Obtenido de Exponential Averaging (Sound and Vibration): <http://zone.ni.com/reference/en-XX/help/372416L-01/svtconcepts/svexponential/>
- National Instruments. (2020). Obtenido de Linear Averaging (Sound and Vibration): <http://zone.ni.com/reference/en-XX/help/372416L-01/svtconcepts/svlinearaveraging/>
- Newland, D. E. (1983). Vibraciones Aleatorias y Análisis Espectral.
- Reeves, C. W. (1998). En C. W. Reeves, The Vibration Monitoring Handbook (págs. 65-85). Coxmoor Publishing Company.
- Roberts, S. (2020). Oxford University. Obtenido de <http://www.robots.ox.ac.uk/~sjrob/>
- Roggema, P. (2016). First day of IFA: miele goes bagless, BSH goes connected. Obtenido de Household appliances factory: <https://www.hafactory.it/2016/09/01/first-day-ifa-miele-goes-bagless-bsh-goes-connected/>
- Steidel, R. F. (1981). En R. F. Steidel, Introducción al estudio de las vibraciones mecánicas (pp. 85-108). CECSA.

Índice de figuras

| | | |
|--------------|---|----|
| Figura 1.1: | Ejemplo de sistema <i>venting</i> . (Roggema, 2016) | 1 |
| Figura 1.2: | Comparativa de cocinas. (Miele, 2019) (Magnetic Cooky, 2020) (Jenn-Air, 2016) (BOSCH, 2019) | 2 |
| Figura 1.3: | Sistema <i>venting</i> completo | 3 |
| Figura 1.4: | Problemas producidos por vibraciones | 4 |
| Figura 1.5: | Sistema a estudio | 4 |
| Figura 2.1: | Elementos principales del sistema a estudio | 7 |
| Figura 2.2: | (Izquierda) Ventilador y voluta. (Derecha) Carcasa | 8 |
| Figura 2.3: | (Izquierda) Placa interior y electrónica. (Derecha) Placa portainductores, panel táctil e inductores | 9 |
| Figura 2.4: | Cristal, filtro y mueble | 9 |
| Figura 2.5: | Uniones: ventilador – voluta, voluta – carcasa, carcasa – placa interior | 10 |
| Figura 2.6: | Uniones: placa interior – cristal, cristal – mueble | 11 |
| Figura 3.1: | Elementos de la cadena de medida | 14 |
| Figura 3.2: | (Izquierda) Filtro paso-banda ideal. (Derecha) Filtros paso-banda reales. | 14 |
| Figura 3.3: | Configuraciones principales de acelerómetros. (Juan Lladó) | 16 |
| Figura 3.4: | Diferentes acelerómetros. (Brüel & Kjær) | 17 |
| Figura 3.5: | Rangos de actuación de cada tipo de acelerómetro | 18 |
| Figura 3.6: | Esquema de funcionamiento de un analizador FFT | 18 |
| Figura 4.1: | Circuito de control del ventilador con velocidad variable | 21 |
| Figura 4.2: | Disposición del equipo | 21 |
| Figura 4.3: | Esquema de la disposición del equipo y software empleados | 22 |
| Figura 4.4: | Relación entre velocidad de giro, voltaje aplicado y niveles del panel táctil | 23 |
| Figura 4.5: | Esquema básico del código empleado para controlar la fuente de alimentación | 23 |
| Figura 4.6: | (Izquierda) Puntos de medida de la unión ventilador – voluta. (Derecha) Puntos de medida de la unión voluta – carcasa | 24 |
| Figura 4.7: | Puntos de medida de la placa interior | 25 |
| Figura 4.8: | Puntos de medida del cristal vitrocerámico | 25 |
| Figura 4.9: | Esquema de trabajo | 25 |
| Figura 4.10: | Comparación de las FFT de varias medidas del acelerómetro del punto 2i | 26 |
| Figura 4.11: | Proceso de obtención de datos a través de MATLAB | 26 |
| Figura 4.12: | Aceleración: 3 niveles | 27 |
| Figura 4.13: | Aceleración: <i>overall</i> | 27 |
| Figura 4.14: | Velocidad: 3 niveles | 28 |
| Figura 4.15: | Velocidad: <i>overall</i> | 28 |
| Figura 4.16: | <i>Waterfall</i> 3D | 29 |
| Figura 4.17: | <i>Waterfall</i> 2D | 30 |
| Figura 4.18: | Velocidades <i>overall</i> de cada acelerómetro de un conjunto de medidas | 31 |
| Figura 4.19: | Velocidades <i>overall</i> de la medida seleccionada | 32 |
| Figura 4.20: | Aceleraciones de los niveles 1, 5 y <i>Booster</i> de la medida seleccionada | 32 |
| Figura 4.21: | Velocidades de los niveles 1, 5 y <i>Booster</i> de la medida seleccionada | 33 |
| Figura 4.22: | <i>Waterfalls</i> 2D de aceleración de la medida seleccionada | 34 |
| Figura 4.23: | <i>Waterfalls</i> 2D de aceleración de la medida seleccionada | 34 |
| Figura 4.24: | <i>Waterfalls</i> 3D de aceleración de la medida seleccionada | 35 |
| Figura 4.25: | <i>Waterfalls</i> 3D de velocidad de la medida seleccionada | 35 |

| | | |
|--------------|--|----|
| Figura 5.1: | Comparación de velocidad y aceleración <i>overall</i> en un punto de medida | 37 |
| Figura 5.2: | Comparación de velocidad <i>overall</i> de la unión ventilador – voluta con la unión voluta – carcasa | 38 |
| Figura 5.3: | Comparación de velocidad <i>overall</i> de la unión voluta – carcasa con la unión placa interior – cristal en la dirección Z | 39 |
| Figura 5.4: | Comparación de velocidad <i>overall</i> de la unión voluta – carcasa con la unión placa interior – cristal en las direcciones X e Y | 40 |
| Figura 5.5: | Comparación de velocidad <i>overall</i> de la unión placa interior – cristal con el cristal | 41 |
| Figura 5.6: | Comparación de velocidad <i>overall</i> del cristal con el mueble | 41 |
| Figura 5.7: | Variaciones del nivel de vibración entre los componentes del sistema a estudio | 42 |
| Figura 5.8: | Velocidades de vibración para diferentes órdenes de excitación | 43 |
| Figura 5.9: | Velocidades de vibración para diferentes frecuencias de resonancia | 43 |
| Figura 5.10: | Velocidades de vibración para diferentes frecuencias eléctricas | 44 |
| Figura 6.1: | Puntos de medida del mueble, cristal y voluta | 47 |
| Figura 6.2: | Velocidades de vibración para diferentes órdenes con y sin electrónica | 48 |
| Figura 6.3: | Velocidades de vibración para los picos de resonancia con y sin electrónica | 49 |
| Figura 6.4: | Velocidades de vibración para las frecuencias eléctricas con y sin electrónica | 49 |
| Figura 7.1: | Puntos de medida de la electrónica | 51 |
| Figura 7.2: | Gráficas FFT del lado izquierdo de la electrónica | 52 |
| Figura 7.3: | Gráficas FFT del lado derecho de la electrónica | 53 |
| Figura 8.1: | Puntos de medida del mapa de vibración | 55 |
| Figura 8.2: | FFT de 4 puntos de medida | 56 |
| Figura 8.3: | Esquema del proceso de “suavizado” de la matriz | 57 |
| Figura 8.4: | Mapa de velocidad de vibración, en dB ref. 10^{-9} m/s | 57 |
| Figura 8.5: | Mapa de aceleración de vibración, en cm/s^2 | 58 |
| Figura 12.1: | Frecuencias naturales de sistemas de uno y múltiples grados de libertad. (Brüel & Kjær) | 75 |
| Figura 12.2: | Parámetros principales de una señal temporal | 76 |
| Figura 12.3: | (Izquierda) Filtros de ancho de banda constante y porcentual. (Derecha) Anchura del filtro y su espectro frecuencial. (Brüel & Kjær, 1999) | 77 |
| Figura 12.4: | Diferentes transformadas de Fourier en el dominio temporal y frecuencial. (Brüel & Kjær, 1999) | 78 |
| Figura 12.5: | (Izquierda) Ventanas rectangular y <i>Hanning</i> . (Derecha) Ponderación exponencial sobre una señal con <i>leakage</i> . (Avitabile, 2019) | 79 |
| Figura 12.6: | Sensibilidad y rango de frecuencias de diversos acelerómetros. (Brüel & Kjær) | 80 |
| Figura 12.7: | Técnicas de montaje de acelerómetros: (Izquierda) fijas, (Derecha) no fijas. (Brüel & Kjær) | 81 |
| Figura 12.8: | Ejemplo de la carta de calibración de un acelerómetro. (Brüel & Kjær, 2018) | 82 |
| Figura 12.9: | Promediación espectral de dos canales | 82 |
| Figura 13.1: | Velocidad <i>overall</i> de la medida seleccionada. Puntos de la unión ventilador - voluta | 86 |
| Figura 13.2: | Velocidad: 3 niveles y <i>overall</i> . Puntos de la unión ventilador - voluta | 87 |
| Figura 13.3: | <i>Waterfall</i> 2D de velocidad. Puntos de la unión ventilador - voluta | 88 |
| Figura 13.4: | <i>Waterfall</i> 3D de velocidad. Puntos de la unión ventilador - voluta | 88 |
| Figura 13.5: | Velocidad <i>overall</i> de la medida seleccionada. Puntos de la unión voluta - carcasa | 89 |
| Figura 13.6: | Velocidad: 3 niveles y <i>overall</i> . Puntos de la unión voluta - carcasa | 90 |
| Figura 13.7: | <i>Waterfall</i> 2D de velocidad. Puntos de la unión voluta - carcasa | 91 |

| | | |
|---------------|---|-----|
| Figura 13.8: | <i>Waterfall</i> 3D de velocidad. Puntos de la unión voluta - carcasa | 91 |
| Figura 13.9: | Comparación de velocidad <i>overall</i> de todas las medidas. Puntos X1 – X2 – X3 | 92 |
| Figura 13.10: | Velocidad <i>overall</i> de la medida seleccionada. Puntos X1 – X2 – X3 | 93 |
| Figura 13.11: | Velocidad: 3 niveles y <i>overall</i> . Puntos X1 – X2 – X3 | 93 |
| Figura 13.12: | <i>Waterfall</i> 2D de velocidad. Puntos X1 – X2 – X3 | 94 |
| Figura 13.13: | Comparación de velocidad <i>overall</i> de todas las medidas. Puntos X4 – X5 – X6 | 95 |
| Figura 13.14: | Velocidad <i>overall</i> de la medida seleccionada. Puntos X4 – X5 – X6 | 95 |
| Figura 13.15: | Velocidad: 3 niveles y <i>overall</i> . Puntos X4 – X5 – X6 | 96 |
| Figura 13.16: | <i>Waterfall</i> 2D de velocidad. Puntos X4 – X5 – X6 | 97 |
| Figura 13.17: | Comparación de velocidad <i>overall</i> de todas las medidas. Puntos Y7 – Y8 – Y9 | 98 |
| Figura 13.18: | Velocidad <i>overall</i> de la medida seleccionada. Puntos Y7 – Y8 – Y9 | 98 |
| Figura 13.19: | Velocidad: 3 niveles y <i>overall</i> . Puntos Y7 – Y8 – Y9 | 99 |
| Figura 13.20: | <i>Waterfall</i> 2D de velocidad. Puntos Y7 – Y8 – Y9 | 100 |
| Figura 13.21: | Comparación de velocidad <i>overall</i> de todas las medidas. Puntos Y10 – Y11 – Y12 | 101 |
| Figura 13.22: | Velocidad <i>overall</i> de la medida seleccionada. Puntos Y10 – Y11 – Y12 | 101 |
| Figura 13.23: | Velocidad: 3 niveles y <i>overall</i> . Puntos Y10 – Y11 – Y12 | 102 |
| Figura 13.24: | <i>Waterfall</i> 2D de velocidad. Puntos Y10 – Y11 – Y12 | 103 |
| Figura 13.25: | Comparación de velocidad <i>overall</i> de todas las medidas. Puntos Z1 – Z2 – Z3 | 104 |
| Figura 13.26: | Velocidad <i>overall</i> de la medida seleccionada. Puntos Z1 – Z2 – Z3 | 104 |
| Figura 13.27: | Velocidad: 3 niveles y <i>overall</i> . Puntos Z1 – Z2 – Z3 | 105 |
| Figura 13.28: | <i>Waterfall</i> 2D de velocidad. Puntos Z1 – Z2 – Z3 | 106 |
| Figura 13.29: | Comparación de velocidad <i>overall</i> de todas las medidas. Puntos Z4 – Z5 – Z6 | 107 |
| Figura 13.30: | Velocidad <i>overall</i> de la medida seleccionada. Puntos Z4 – Z5 – Z6 | 107 |
| Figura 13.31: | Velocidad: 3 niveles y <i>overall</i> . Puntos Z4 – Z5 – Z6 | 108 |
| Figura 13.32: | <i>Waterfall</i> 2D de velocidad. Puntos Z4 – Z5 – Z6 | 109 |
| Figura 13.33: | Comparación de velocidad <i>overall</i> de todas las medidas. Puntos Z7 – Z8 – Z9 | 109 |
| Figura 13.34: | Velocidad <i>overall</i> de la medida seleccionada. Puntos Z7 – Z8 – Z9 | 110 |
| Figura 13.35: | Velocidad: 3 niveles y <i>overall</i> . Puntos Z7 – Z8 – Z9 | 111 |
| Figura 13.36: | <i>Waterfall</i> 2D de velocidad. Puntos Z7 – Z8 – Z9 | 112 |
| Figura 13.37: | Comparación de velocidad <i>overall</i> de todas las medidas. Puntos Z10 – Z11 – Z12 | 113 |
| Figura 13.38: | Velocidad <i>overall</i> de la medida seleccionada. Puntos Z10 – Z11 – Z12 | 113 |
| Figura 13.39: | Velocidad: 3 niveles y <i>overall</i> . Puntos Z10 – Z11 – Z12 | 114 |
| Figura 13.40: | <i>Waterfall</i> 2D de velocidad. Puntos Z10 – Z11 – Z12 | 115 |
| Figura 13.41: | Comparación de velocidad <i>overall</i> de todas las medidas. Puntos del cristal, parte izquierda | 116 |
| Figura 13.42: | Velocidad <i>overall</i> de la medida seleccionada. Puntos del cristal, parte izquierda | 116 |
| Figura 13.43: | Aceleración: 3 niveles y <i>overall</i> . Puntos del cristal, parte izquierda | 117 |
| Figura 13.44: | Velocidad: 3 niveles y <i>overall</i> . Puntos del cristal, parte izquierda | 118 |
| Figura 13.45: | <i>Waterfall</i> 2D de velocidad. Puntos del cristal, parte izquierda | 119 |
| Figura 13.46: | <i>Waterfall</i> 3D de velocidad. Puntos del cristal, parte izquierda | 119 |
| Figura 13.47: | Comparación de velocidad <i>overall</i> de todas las medidas. Puntos del cristal, parte derecha | 120 |
| Figura 13.48: | Velocidad <i>overall</i> de la medida seleccionada. Puntos del cristal, parte derecha | 120 |
| Figura 13.49: | Aceleración: 3 niveles y <i>overall</i> . Puntos del cristal, parte derecha | 121 |
| Figura 13.50: | Velocidad: 3 niveles y <i>overall</i> . Puntos del cristal, parte derecha | 122 |
| Figura 13.51: | <i>Waterfall</i> 2D de velocidad. Puntos del cristal, parte derecha | 123 |

| | | |
|---------------|---|-----|
| Figura 13.52: | <i>Waterfall</i> 3D de velocidad. Puntos del cristal, parte derecha | 123 |
| Figura 13.53: | Comparación de velocidad <i>overall</i> de todas las medidas. Puntos del mueble | 124 |
| Figura 13.54: | Velocidad <i>overall</i> de la medida seleccionada. Puntos del mueble | 124 |
| Figura 13.55: | Aceleración: 3 niveles y <i>overall</i> . Puntos del mueble | 125 |
| Figura 13.56: | Velocidad: 3 niveles y <i>overall</i> . Puntos del mueble | 126 |
| Figura 13.57: | <i>Waterfall</i> 2D de velocidad. Puntos del mueble | 127 |
| Figura 13.58: | <i>Waterfall</i> 3D de velocidad. Puntos del mueble | 127 |
| Figura 14.1: | Mapas de velocidad de vibración | 130 |
| Figura 14.2: | Mapas de aceleración de vibración | 132 |

Listado de Tablas

| | | |
|-------------|---|----|
| Tabla 4.1: | Parámetros del circuito de control del ventilador. (Ebmpapst, 2004) | 21 |
| Tabla 5.1: | Variación de la vibración transmitida por los componentes del sistema a estudio | 45 |
| Tabla 5.2: | Influencia de los picos relevantes en la velocidad máxima de vibración | 45 |
| Tabla 12.1: | Ventanas temporales en análisis de señales. (Brüel & Kjør, 1999) | 80 |
| Tabla 12.2: | Funciones empleadas en análisis de sistemas. (Brüel & Kjør, 1999) | 83 |

Listado de Símbolos

| Símbolo | Unidad | Descripción |
|-------------------|----------------|---|
| A | m | Amplitud |
| a | m/s^2 | Aceleración |
| a_{ref} | m/s^2 | Aceleración de referencia |
| a_{pico} | m/s^2 | Aceleración de pico |
| B | Hz | Ancho de banda |
| c | N/(m/s) | Amortiguamiento |
| d | m | Desplazamiento |
| d_{pico} | m | Desplazamiento de pico |
| f_0 | Hz | Frecuencia central |
| f_c | Hz | Frecuencia del filtro <i>antialiasing</i> |
| f_s | Hz | Frecuencia de muestreo |
| k | N/m | Constante elástica |
| m | kg | Masa |
| n | rpm | Número de revoluciones por minuto |
| T | s | Período |
| t | s | Tiempo de medida |
| ω | rad/s | Frecuencia angular |

Listado de Abreviaciones

| Abreviación | Descripción |
|-------------|-----------------------------------|
| DFT | <i>Discrete Fourier Transform</i> |
| FFT | <i>Fast Fourier Transform</i> |
| GND | <i>Ground</i> |
| HAV | <i>Hand Arm Vibration</i> |
| MTTI | <i>Mean Time To Identify</i> |
| SELV | <i>Safety Extra-Low Voltage</i> |
| RMS | <i>Root Mean Square</i> |

11. Anexo I: Características de los elementos del sistema

11.1 Ventilador

- Designación: Módulo Centrífugo – R3G200 – AI5310
- Tipo de motor: M3G074 – CF
- Peso: 2.15 kg
- Velocidad de rotación: 1760 rpm
- Número de palas: 38
- Dirección de rotación: derecha
- Tipo de rodamiento: rodamiento de bolas
- Rango de voltaje nominal: 200 – 240 V
- Frecuencia: 50 – 60 Hz
- Potencia nominal: 165 W
- Material del rodete: acero galvanizado
- Función: absorción y extracción de gases generados en la cocina de inducción.

11.2 Voluta

- Designación: Módulo Centrífugo – R3G200 – AI5310
- Volumen: 770 cm³
- Material: Polipropileno + 20% relleno de Talco
 - Módulo de Young: 2100 MPa
 - Densidad: 1370 kg/m³

Función: proyección del aire saliente del ventilador.

11.3 Carcasa

- Designación: Módulo Centrífugo – R3G200 – AI5310
- Volumen: 770 cm³
- Material: Polipropileno + 20% relleno de Talco
 - Módulo de Young: 2100 MPa
 - Densidad: 1370 kg/m³
- Función: sujeción del conjunto, almacenamiento de residuos.

11.4 Placas con electrónica e inductores

Respecto a la placa portainductores:

- Designación: *Venting Cooktop aluminium plate.*
- Material: Aluminio EN – 3003 H24
- Grosor: 1.5 mm
- Función: sujeción y posicionamiento de los inductores y del panel táctil.

12. Anexo II: Ampliación de conocimientos teóricos previos

12.1 Señales vibratorias

Para cuantificar vibraciones, primero es necesario realizar medidas, y posteriormente analizar el resultado, niveles y frecuencias de cada una. Antes de analizar los resultados es necesario conocer los tipos de señales de vibración que se pueden encontrar: señales estacionarias o no estacionarias, deterministas o aleatorias, continuas o transitorias.

Los parámetros mecánicos principales de las señales vibratorias son: desplazamiento, d ; velocidad, v ; y aceleración, a . Cada uno de ellos está relacionado con la fuerza aplicada a un sistema, F , mediante la constante elástica, k ; el amortiguamiento, c ; y la masa, m (Ecuaciones 12.1 a 12.3). (Brüel & Kjær)

$$F = k \cdot d \quad (12.1) \quad F = c \cdot v \quad (12.2)$$

$$F = m \cdot a \quad (12.3)$$

Se pueden distinguir vibraciones libres y forzadas. Se diferencian en que en las vibraciones libres no actúa ninguna fuerza externa sobre el sistema, al contrario que las forzadas. En las vibraciones libres, la energía total se reparte entre energía cinética y energía potencial. Al aumentar la masa disminuye la frecuencia de oscilación y al aumentar la amortiguación disminuye la amplitud. Además se pueden encontrar sistemas de uno o varios grados de libertad. Las frecuencias naturales de cada uno de ellos son similares a las presentadas en la Figura 12.1. (Brüel & Kjær)

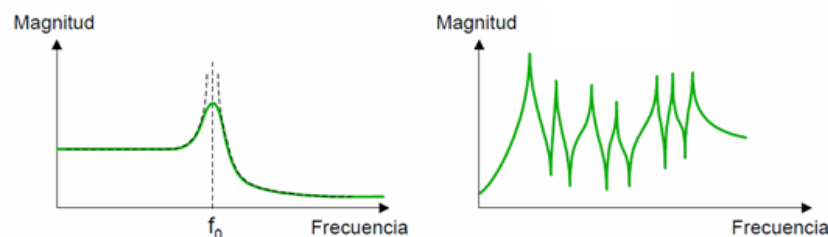


Figura 12.1: Frecuencias naturales de sistemas de uno y múltiples grados de libertad. (Brüel & Kjær)

Los motivos principales para la medición de vibración son: la verificación de que las frecuencias y amplitud de vibración no exceden los límites de ruptura de los materiales, la capacidad de aislar vibraciones y la construcción o comprobación de modelos matemáticos de estructuras. El análisis de vibraciones se emplea tanto en la industria automovilística como aeronáutica y naval, reduciendo excitaciones y resonancias y proporcionando un mayor confort al usuario. (Brüel & Kjær)

Los parámetros empleados para obtener información de una señal temporal son (Figura 12.2): amplitud de pico, de pico a pico, valor medio, valor eficaz (RMS), factor de cresta, período y duración.

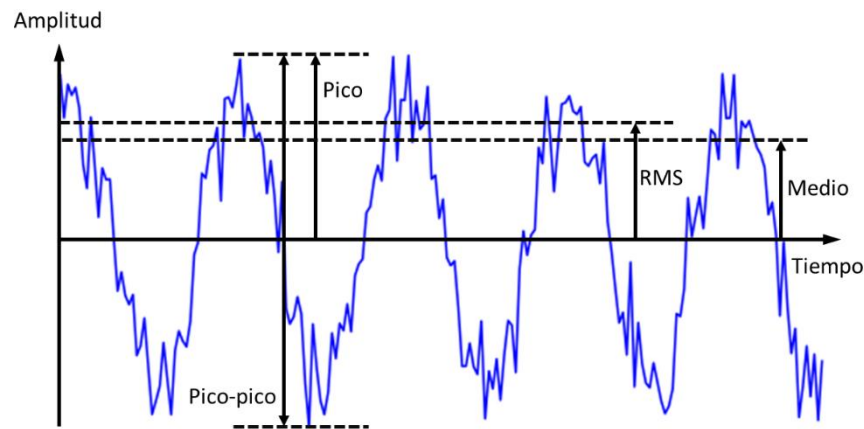


Figura 12.2: Parámetros principales de una señal temporal

Las Ecuaciones 12.4 a 12.9 muestran las conversiones entre los parámetros mecánicos y las propiedades principales del movimiento ondulatorio, respectivamente. En primer lugar, aparecen las funciones de cada onda en función del tiempo, y posteriormente el valor del pico de amplitud de cada una de ellas, expresadas en función del valor de pico de la aceleración, A . (Brüel & Kjær)

$$a = A \sin \omega t \quad (12.4) \quad a_{\text{pico}} = A \quad (12.5)$$

$$v = \int a \, dt = -\frac{A}{\omega} \cos \omega t \quad (12.6) \quad v_{\text{pico}} = \frac{A}{\omega} = \frac{A}{2\pi f} \quad (12.7)$$

$$d = \iint a \, dt \, dt = -\frac{A}{\omega^2} \sin \omega t \quad (12.8) \quad d_{\text{pico}} = \frac{A}{\omega^2} = \frac{A}{4\pi^2 f^2} \quad (12.9)$$

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt} \quad (12.10) \quad \text{Media} = \frac{1}{T} \int_0^T |x(t)| dt \quad (12.11)$$

$$\text{Factor de cresta} = \frac{\text{Pico}}{\text{RMS}} \quad (12.12)$$

12.2 Tipos de filtros

En este subapartado se realizan explicaciones adicionales a las correspondientes al Capítulo 3.1.

Existen dos tipos principales de filtros: el filtro de ancho de banda constante y el de ancho de banda porcentual (Figura 12.3). El primero de ellos se debe aplicar en un eje de frecuencias lineal y el segundo en uno logarítmico para poder observar su forma correctamente, su frecuencia central y su ancho de banda. Dependiendo de si empleamos un filtro y otro, se deberá elegir el eje de frecuencias correcto para su visualización. Una vez seleccionado el filtro adecuado, es necesario seleccionar su ancho de banda: un ancho de banda mayor proporcionará una visualización de la señal con menor resolución pero de una forma más rápida, mientras que un filtro con un ancho de banda menor proporcionará una visualización con mejor resolución pero tendrá un coste computacional mayor (Figura 12.3). En el siguiente apartado se menciona el filtro *anti-aliasing*.

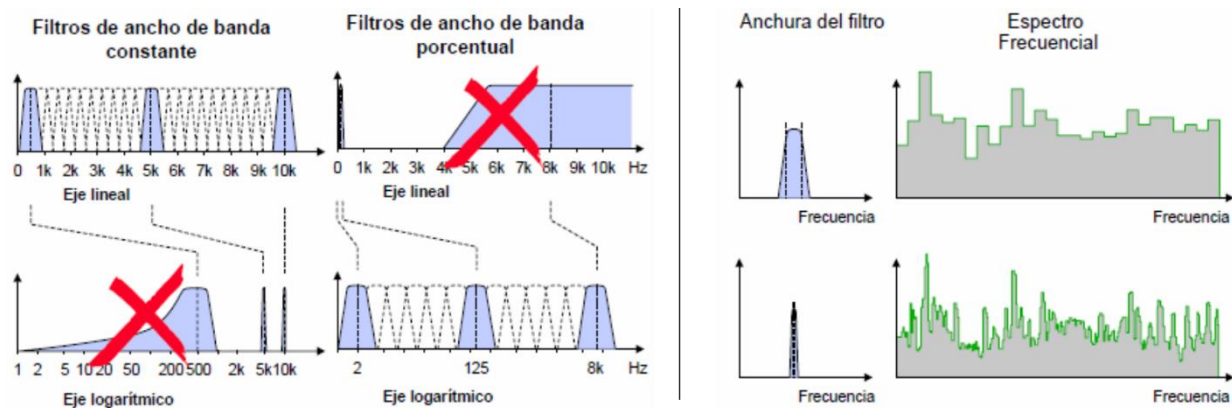


Figura 12.3: (Izquierda) Filtros de ancho de banda constante y porcentual. (Derecha) Anchura del filtro y su espectro frecuencial. (Brüel & Kjær, 1999)

12.3 FFT y DFT

La DFT es la equivalente discreta a la Transformada Continua de Fourier para señales conocidas a N instantes separadas por tiempos de muestreo T . Sea $f(t)$ la señal continua que es la fuente de datos, considerando N muestras denotadas $f[0], f[1], f[2], \dots, f[k], \dots, f[N-1]$. La Transformada de Fourier de la señal original, $f(t)$, sería: (Roberts, 2020)

$$F(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt \quad (12.13)$$

Se podría considerar cada muestra $f[k]$ como un impulso de área $f[k]$, por lo que el integrando existiría solamente en los puntos de muestreo: (Roberts, 2020)

$$F(j\omega) = \sum_{k=0}^{N-1} f[k]e^{-j\omega kT} \quad (12.14)$$

La Transformada continua de Fourier puede evaluarse sobre un intervalo finito en vez de $-\infty$ a $+\infty$ en el caso de que la forma de onda sea periódica. De la misma manera, al haber un número finito de puntos de entrada, la DFT trata los datos como si fueran periódicos, por lo que se puede evaluar la ecuación (3.2) en la frecuencia fundamental $\omega = \frac{2\pi}{NT}$ y en sus armónicos. $F[n]$ es la DFT de la secuencia $f[k]$: (Roberts, 2020)

$$F[n] = \sum_{k=0}^{N-1} f[k]e^{-j\frac{2\pi}{N}nk} \quad (n = 0 : N-1) \quad (12.15)$$

La FFT es un algoritmo para obtener la DFT con un significativo menor número de operaciones aritméticas comparado con una evaluación directa de la expresión analítica. Es probablemente la técnica más importante de análisis de señales (Brüel & Kjær, 1999). La Figura 12.4 muestra los tipos de Transformadas de Fourier y sus gráficas en el tiempo y frecuencia.

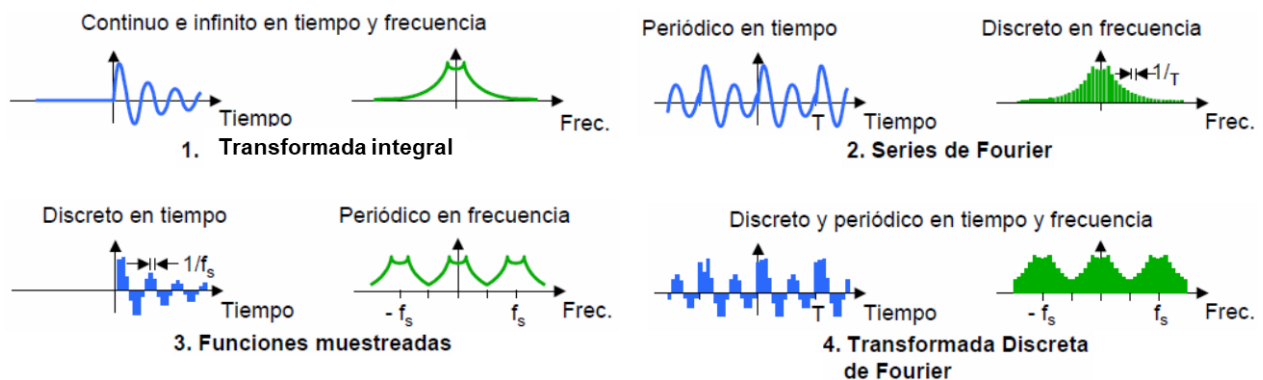


Figura 12.4: Diferentes transformadas de Fourier en el dominio temporal y frecuencial. (Brüel & Kjær, 1999)

Existen una serie de problemas inherentes al empleo de la DFT:

- *Aliasing*: causado por el muestreo de la señal temporal, las altas frecuencias después de ser muestreadas pueden aparecer como bajas. Esto se elimina con un filtrado de paso bajo (filtro *anti-aliasing*) a la señal antes de muestrear para asegurarse de que no contiene frecuencias por encima de la frecuencia de muestreo. (Brüel & Kjær, 1999)
- *Leakage*: causado por la limitación temporal. Al estudiar un sistema, es posible que su respuesta no disminuya a cero al finalizar el intervalo de muestreo. Cuando esto sucede, la transformación de los datos sufre significativamente por este efecto del procesamiento digital de señales, *leakage* (Avitabile, 2019). Para reducirlo, es necesario utilizar una función de ponderación, también conocida como ventana, empleada para satisfacer los requisitos del proceso FFT.
- Efecto *picket fence*: causado por el muestreo discreto del espectro en el dominio frecuencial. Ocurre un efecto análogo cuando se mira a través de los tablones de una valla (de ahí su nombre). Al mirar a través de éstos, se observa parte del interior, pero no al completo. Es similar con el procesamiento de señales, dependiendo así del solapamiento (*overlap*) empleado. (Brüel & Kjær, 1999)

Para solucionar tanto el *leakage* como el efecto *picket fence*, se utilizan ventanas en el proceso de muestreo (toma de una muestra significativa de la señal completa). Una ventana es una función de ponderación empleada para disminuir o eliminar el *leakage* presente en una señal muestreada. La Figura 12.5 muestra dos ejemplos de ventanas comunes (izquierda) y el proceso de ponderación exponencial sobre una señal temporal (derecha) (Brüel & Kjær, 1999).

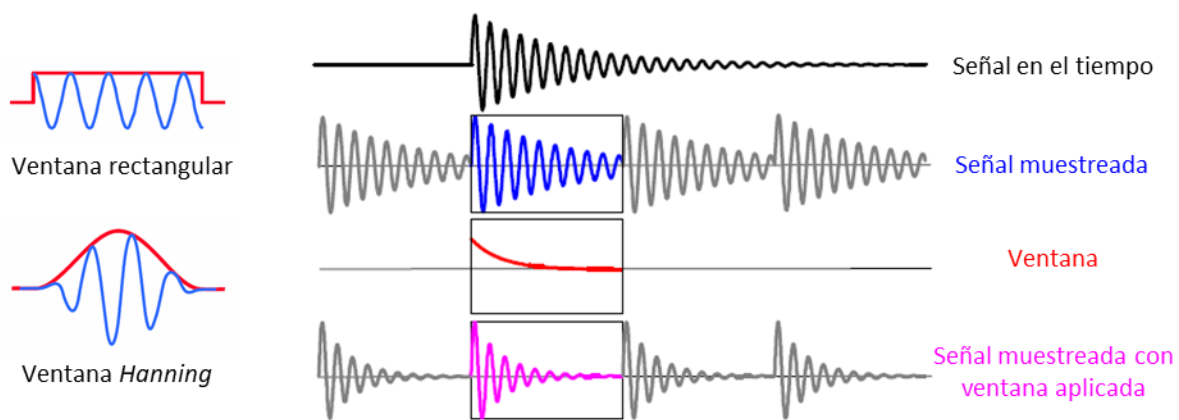


Figura 12.5: (Izquierda) Ventanas rectangular y *Hanning*. (Derecha) Ponderación exponencial sobre una señal con *leakage*. (Avitabile, 2019)

Dependiendo del tipo de señal que se quiera analizar, se debe de emplear un tipo de ventana u otro. La Tabla 12.1 muestra los tipos de ventanas a emplear dependiendo de la señal que se desee analizar.

| | Ponderación o ventana | | | | | |
|--------------------|-----------------------|--------------------|------------------|-------------|----------------------|-----------------|
| | Rectangular | <i>Hanning</i> | <i>Transient</i> | Exponencial | <i>Kaiser-Bessel</i> | <i>Flat Top</i> |
| Transitorios: | ----- | ----- | ----- | ----- | ----- | ----- |
| - General | ● | | | | | |
| - Corto | | | ● | | | |
| - Largo | | | | ● | | |
| - Muy largo | | ● + <i>overlap</i> | | | | |
| Señal continua: | ----- | ----- | ----- | ----- | ----- | ----- |
| - General | | ● | | | | |
| - Separación tonal | | | | | ● | |
| - Calibración | | | | | | ● |
| - Pseudoaleatoria | ● | | | | | |

Tabla 12.1: Ventanas temporales en análisis de señales. (Brüel & Kjær, 1999)

12.4 Acelerómetros

En este subapartado se realizan explicaciones adicionales a las correspondientes al Capítulo 3.1.

En la Figura 12.6 se muestra una explicación del rango útil de frecuencias de diversos acelerómetros dependiendo del tamaño y uso.

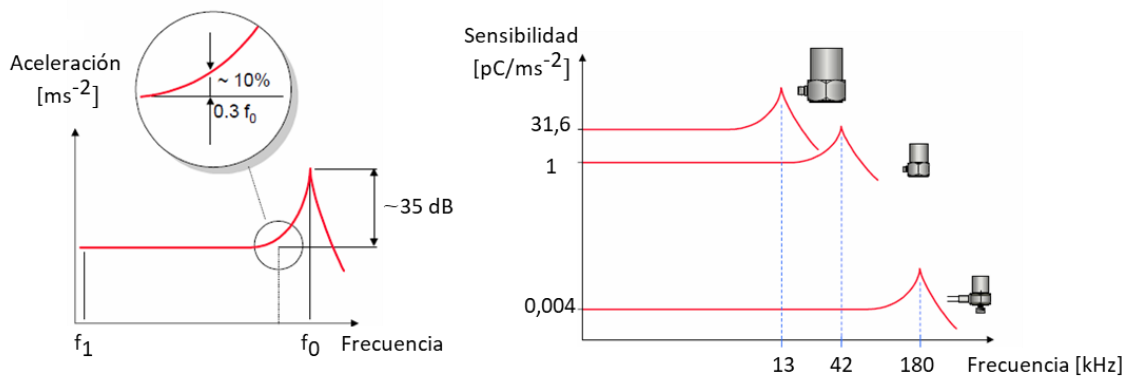


Figura 12.6: Sensibilidad y rango de frecuencias de diversos acelerómetros. (Brüel & Kjær)

Existen diversas técnicas de montaje de los acelerómetros. Se pueden distinguir en fijos y no fijos. Dentro de los fijos, se pueden montar con cinta adhesiva de doble cara, con un disco roscado adherido, con un vástago roscado o con cera de abeja. Dentro de los no fijos, existen los apoyos manual e invertido y con un imán (Figura 12.7). Dependiendo de la técnica de montaje del acelerómetro, se debe de tener en cuenta que la respuesta variará, obteniendo picos de medida a frecuencias diferentes.

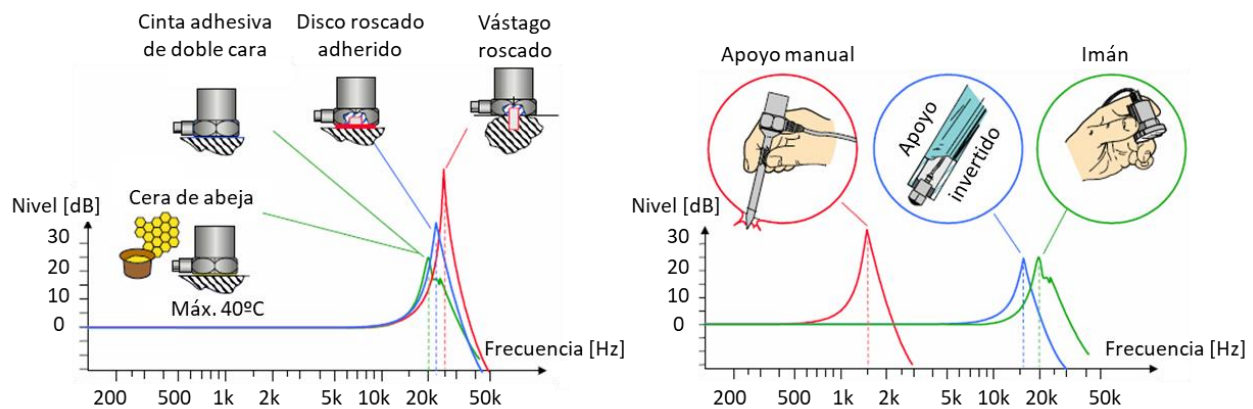


Figura 12.7: Técnicas de montaje de acelerómetros: (Izquierda) fijas, (Derecha) no fijas. (Brüel & Kjær)

A continuación se mencionan diversos efectos ambientales que pueden no sólo alterar la señal de salida de un acelerómetro, sino llegar a inutilizarlos temporal o incluso permanentemente: deformación de la base de apoyo, humedad ambiental, ruido acústico, sustancias corrosivas, campos magnéticos externos y radiación nuclear. (Brüel & Kjær)

Posteriormente se menciona la carta de calibración (Figura 12.8). Cada acelerómetro se debe calibrar de manera independiente, obteniendo unas curvas de funcionamiento diferentes. Dentro de la carta de calibración se indican todos los detalles propios de cada acelerómetro: número de serie, rango de frecuencia, resonancia de frecuencia, rango de medidas, tiempo de recuperación tras una sobrecarga...

Los acelerómetros empleados en el trabajo son Brüel & Kjær DeltaTron® Tipo 4397. Los acelerómetros DeltaTron® se diferencian del resto en que incluyen un amplificador interno, necesitan una alimentación con corriente constante, no necesitan cables de bajo ruido, son más baratos en configuraciones multicanal y soportan una temperatura máxima de hasta 125 °C. (Brüel & Kjær)

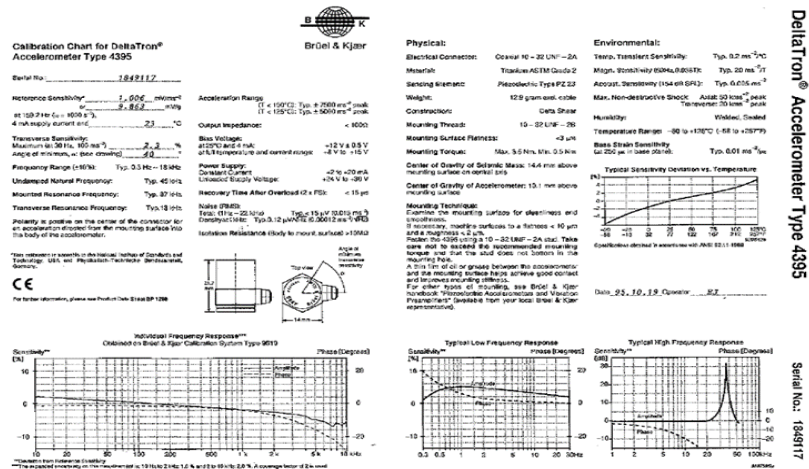


Figura 12.8: Ejemplo de la carta de calibración de un acelerómetro. (Brüel & Kjær, 2018)

12.5 Análisis FFT de dos canales y funciones empleadas

En el análisis FFT de dos canales se realizan medidas simultáneas en la entrada y salida. Se miden los autospectros de la entrada y salida y el espectro cruzado entre ellas. A partir de estas medidas básicas se pueden calcular muchas otras funciones (Figura 12.9). (Brüel & Kjær, 1999)

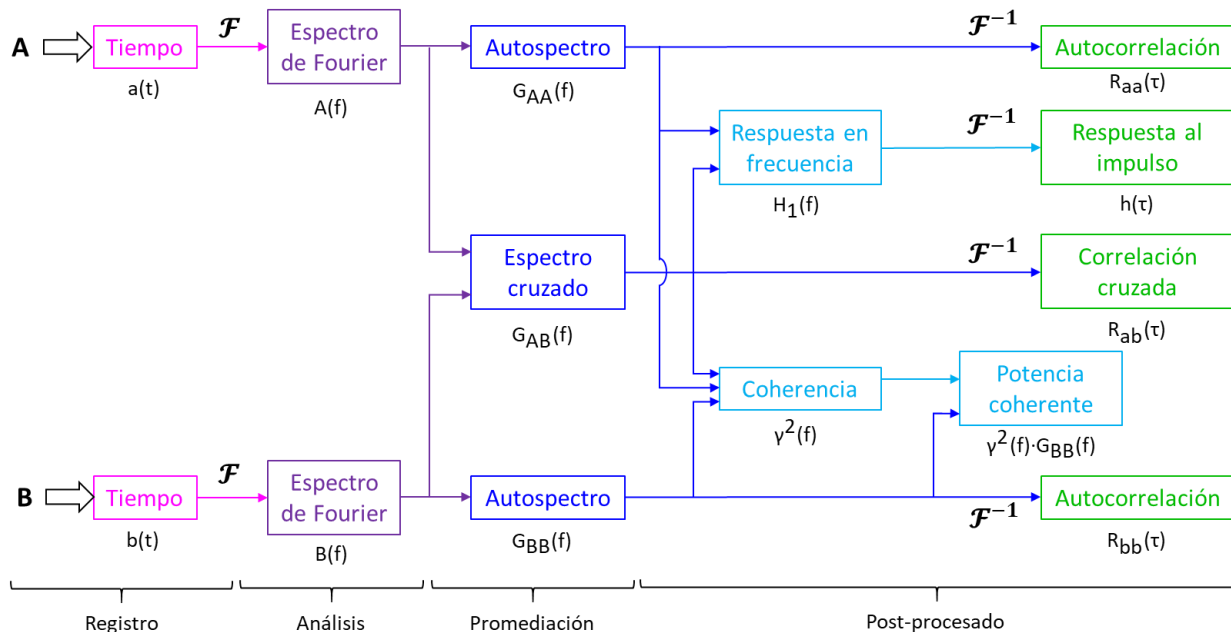


Figura 12.9: Promediación espectral de dos canales

El conjunto de funciones usadas en análisis de sistemas se menciona y detalla en la Tabla 12.2:

| Símbolo | Función | Definición | Usos |
|--|--|--|--|
| a(t) b(t) | Tiempo instantáneo | Función temporal de entrada (salida) del sistema | Observación de señales temporales |
| A(f) B(f) | Espectro instantáneo | Transformada de Fourier de la señal temporal | Observación espectral sin promediar |
| G _{AA} (f) G _{BB} (f) | Autospectro | Promedio temporal de la magnitud cuadrática del espectro instantáneo | Forma más habitual de observar los espectros |
| G _{AB} (f) | Espectro cruzado | $G_{AB}(f) = \overline{A^*(f) \cdot B(f)}$ | Base para calcular otras funciones |
| | | | Su fase es la fase entre las dos señales |
| | | | En acústica, para calcular la intensidad |
| $\gamma^2(f)$ | Coherencia | $\gamma^2(f) = \frac{ G_{AB}(f) ^2}{G_{AA}(f) \cdot G_{BB}(f)}$ $0 \leq \gamma^2(f) \leq 1$ | Mide el grado de linealidad entre dos señales |
| | | | Comprobación de la existencia de ruido |
| | | | Función base para calcular otras funciones |
| COP(f) | Potencia coherente | $COP(f) = \gamma^2(f) \cdot G_{BB}(f)$ | Mide qué parte de la señal de salida es coherente con la señal de entrada |
| NCOP(f) | Potencia no coherente | $NCOP(f) = [1 - \gamma^2(f)] \cdot G_{BB}(f)$ | Mide qué parte de la señal de salida NO es coherente con la señal de entrada |
| S/N | Relación señal de ruido | $\frac{S}{N} = \frac{\gamma^2(f)}{1 - \gamma^2(f)}$ | Sólo válido si se asume que el ruido de salida es el único factor que afecta a la coherencia |
| H(f) | Respuesta en frecuencia (función de transferencia) | $H(f) = \frac{B(f)}{A(f)}$ | Descripción completa de un sistema lineal e invariante en el tiempo. |
| H ₁ (f) | Estimador de H(f) | $H_1(f) = \frac{G_{AB}(f)}{G_{AA}(f)}$ | Función a elegir cuando el sistema puede tener ruido a la salida |
| H ₂ (f) | Estimador de H(f) | $H_2(f) = \frac{G_{BB}(f)}{G_{BA}(f)}$ | Función a elegir cuando el sistema puede tener ruido a la salida |
| R _{ab} (τ) | Correlación cruzada | $R_{ab}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} a(t) b(t + \tau) dt$ | Detección de retardos temporales entre dos señales |
| | | | Extracción de señales comunes contaminadas por ruido |
| R _{aa} (τ) | Autocorrelación | $R_{aa}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} a(t) a(t + \tau) dt$ | Detección de una señal periódica inmersa en ruido |
| h(t) | Respuesta al impulso | $h(t) = \mathcal{F}^{-1} \{H(f)\}$ | Extracción de parámetros modales en sistemas de varios grados de libertad |

Tabla 12.2: Funciones empleadas en análisis de sistemas. (Brüel & Kjør, 1999)

13. Anexo III: Características del equipo empleado y gráficas

En este anexo se profundiza en los detalles correspondientes al equipo empleado en el proceso de medida dentro del capítulo 4. Además se incluye la (casi) totalidad de las gráficas obtenidas a través de todo el trabajo realizado.

13.1 Multianalizador FFT

- Entrada de 2 canales
- Salida de 4 canales
- Frecuencia de salida de 50 kHz
- Número de serie: 3160 -100004

13.2 Acelerómetros

- X: número de serie 30029
- Y: número de serie 2258845
- Z: número de serie 30033
- 4: número de serie 10619

13.3 Gráficas

Se presenta a continuación la (casi) totalidad de las figuras obtenidas a lo largo del proceso de trabajo. El orden a seguir es:

1. Puntos de la unión ventilador – voluta
2. Puntos de la unión voluta – carcasa
3. Puntos de la placa interior: ejes X-Y-Z

4. Puntos del cristal, parte izquierda
5. Puntos del cristal, parte derecha
6. Puntos del mueble

Dentro de cada medida se presentan las siguientes gráficas:

- El conjunto de velocidad *overall* sin desechar de todas las medidas para cada acelerómetro para los puntos de la placa interior, del cristal y del mueble.
- La velocidad *overall* de los 4 acelerómetros en una sola imagen de la medida elegida.
- Las gráficas de velocidad a 3 colores, con los acelerómetros ordenados de la siguiente manera: 1, arriba a la izquierda; 2, arriba a la derecha; 3, abajo a la izquierda; 4 (si lo hubiere), abajo a la derecha. De la misma forma con los puntos 4, 5 y 6; 7, 8 y 9; 10, 11 y 12.
- Las gráficas de aceleración a 3 colores, con los acelerómetros ordenados de la misma manera, para los puntos del cristal y del mueble.
- Los *Waterfalls* en 2D, con los acelerómetros ordenados de la misma manera.
- Los *Waterfalls* en 3D, con los acelerómetros ordenados de la misma manera, para los puntos de las uniones ventilador – voluta, voluta – carcasa, del cristal y del mueble.

13.3.1 Puntos de la unión ventilador – voluta

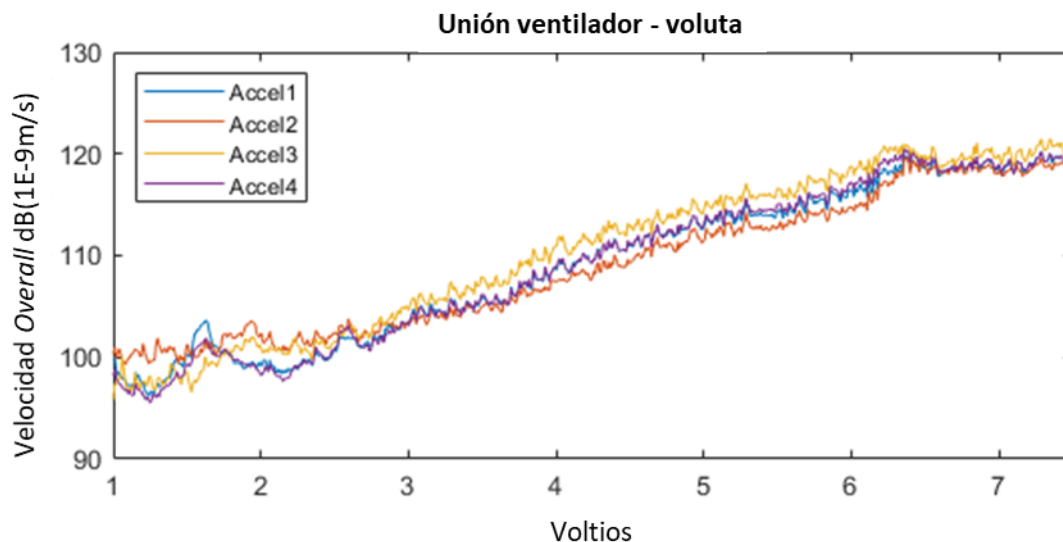


Figura 13.1: Velocidad *overall* de la medida seleccionada. Puntos de la unión ventilador - voluta

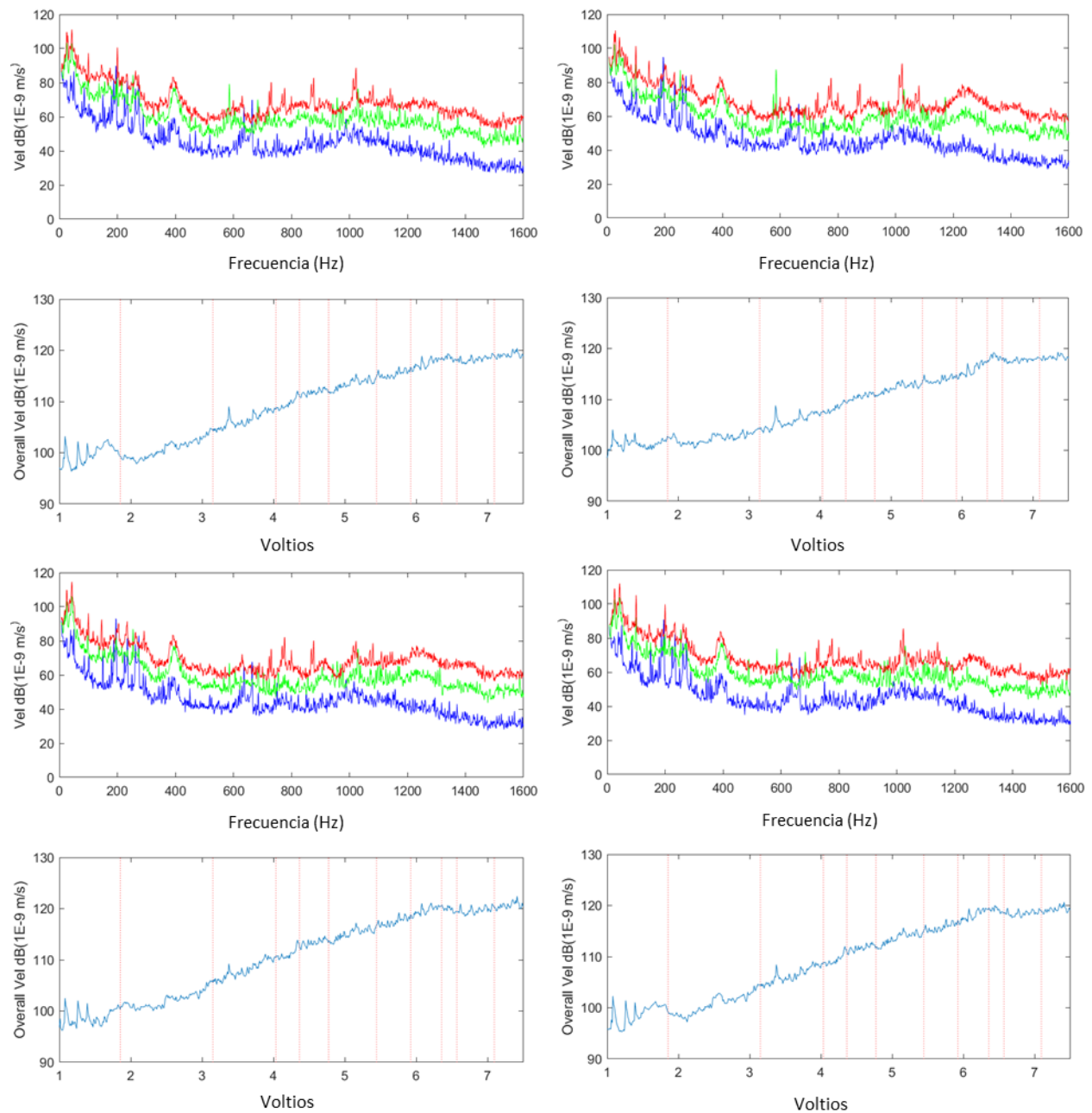


Figura 13.2: Velocidad: 3 niveles y *overall*. Puntos de la unión ventilador – voluta

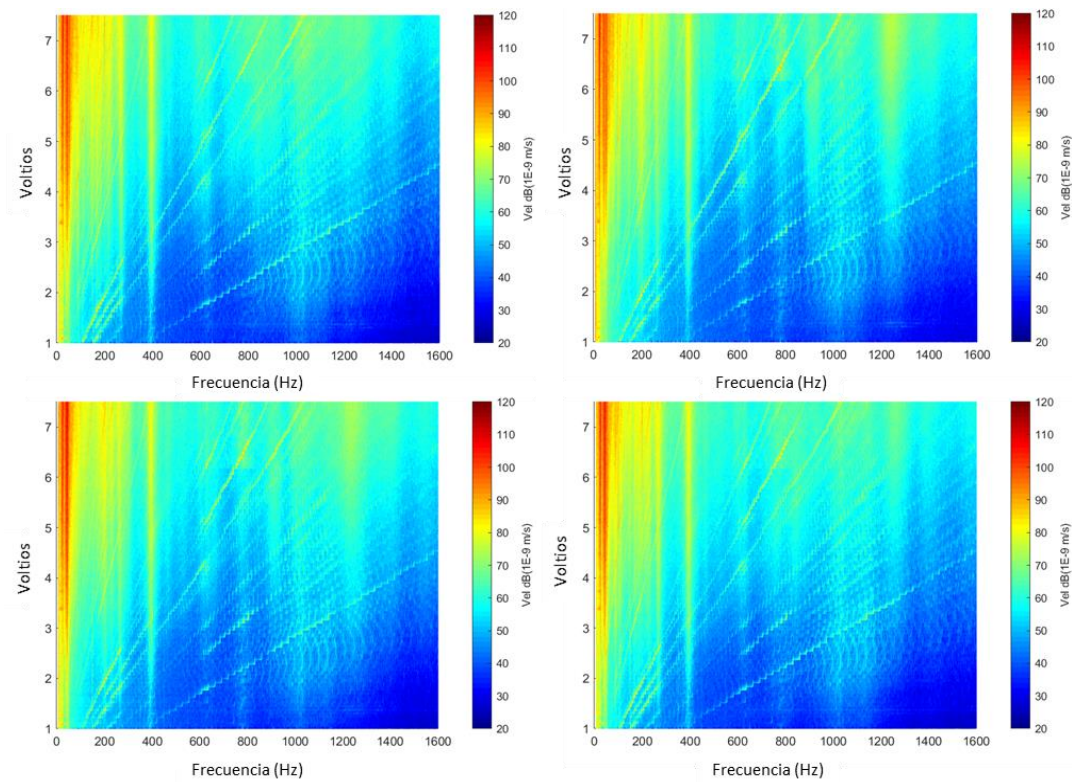


Figura 13.3: *Waterfall* 2D de velocidad. Puntos de la unión ventilador - voluta

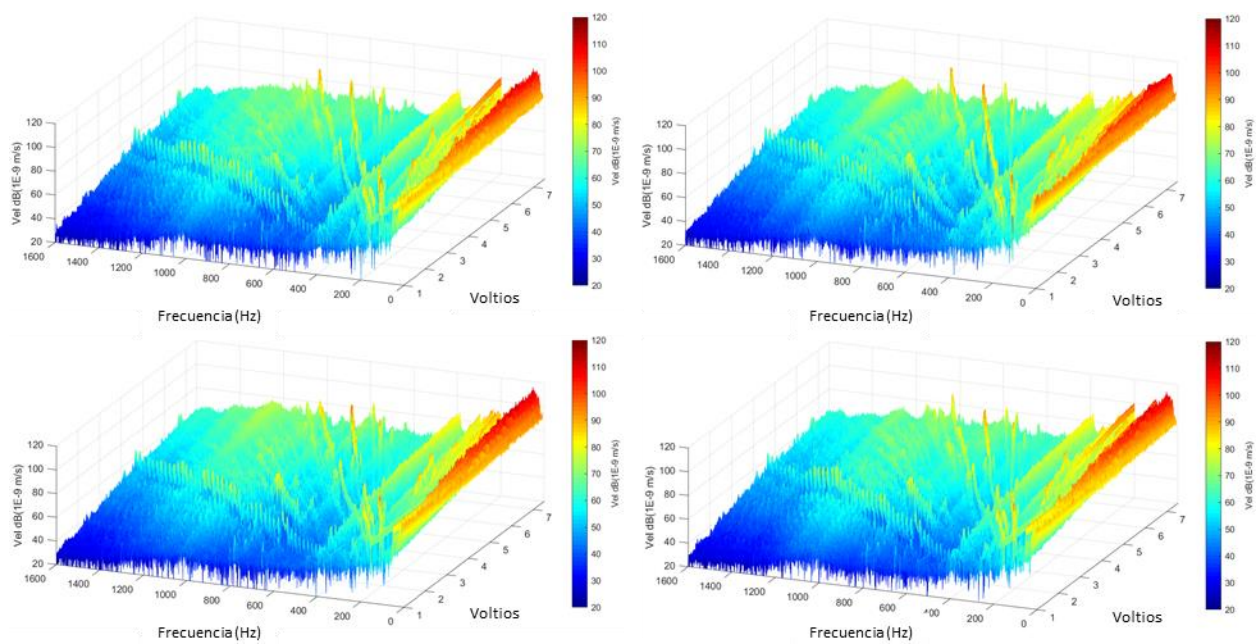
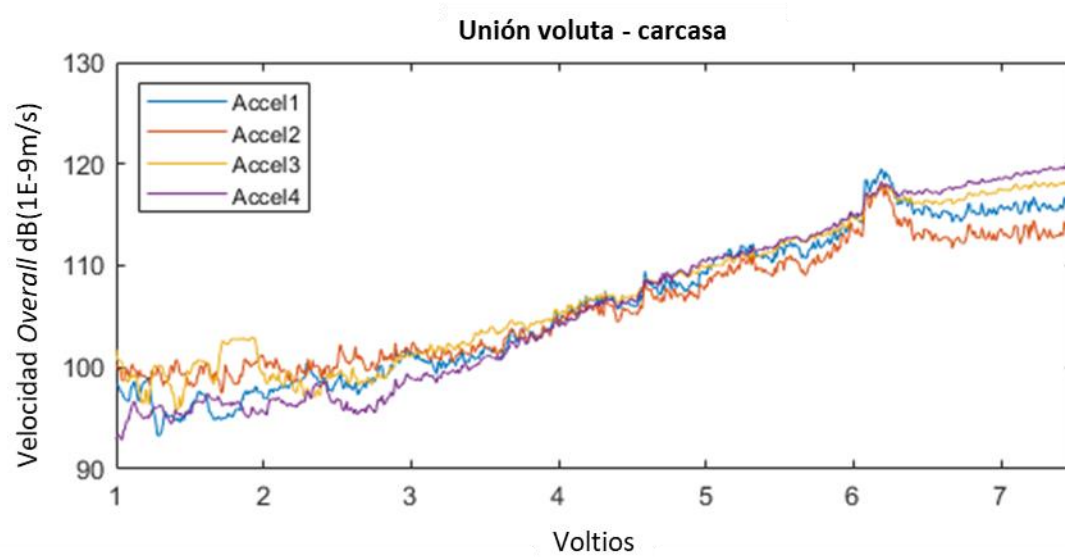


Figura 13.4: *Waterfall* 3D de velocidad. Puntos de la unión ventilador - voluta

13.3.2 Puntos de la unión voluta – carcasa

Figura 13.5: Velocidad *overall* de la medida seleccionada. Puntos de la unión voluta - carcasa

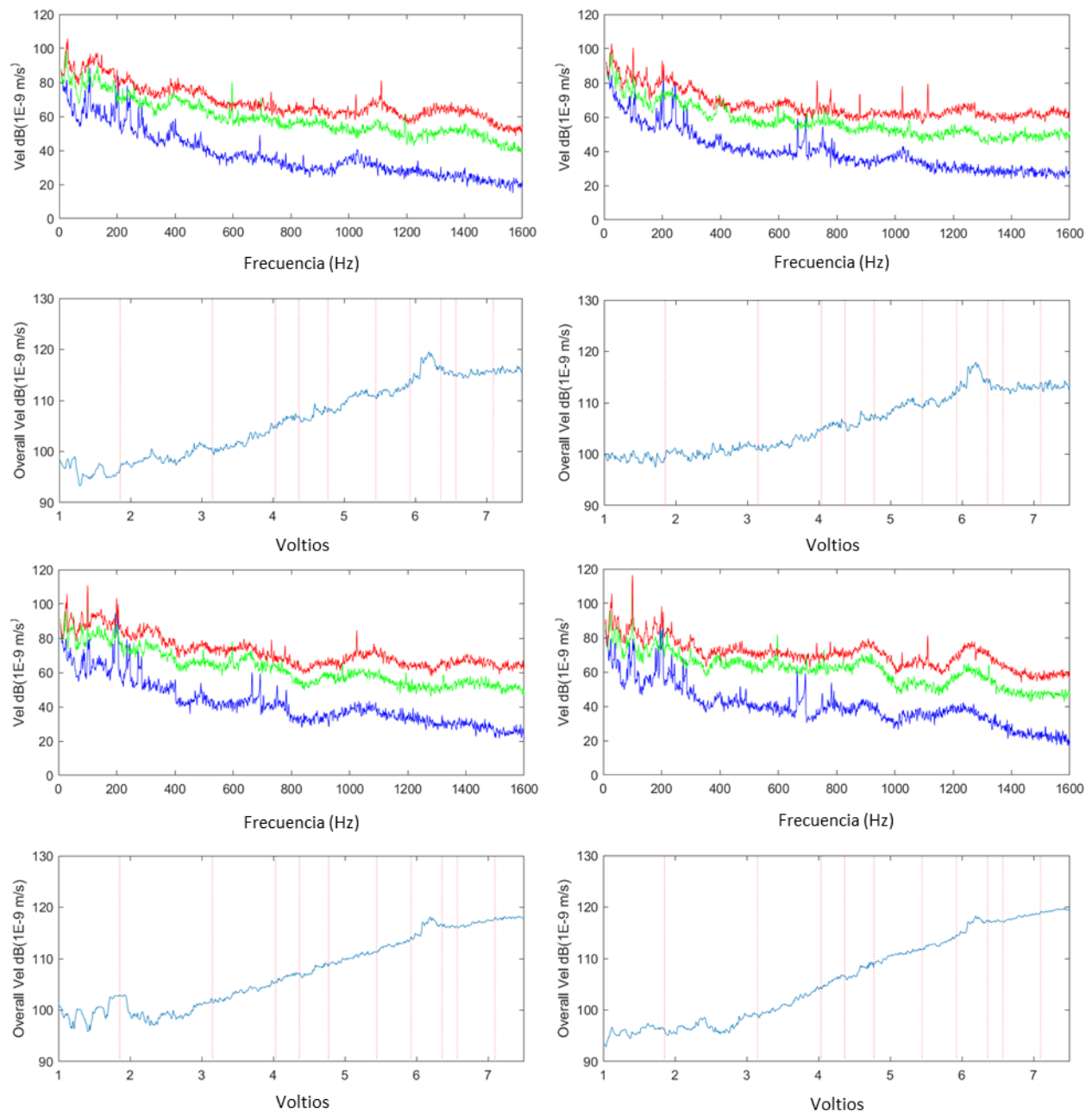


Figura 13.6: Velocidad: 3 niveles y *overall*. Puntos de la unión voluta - carcasa

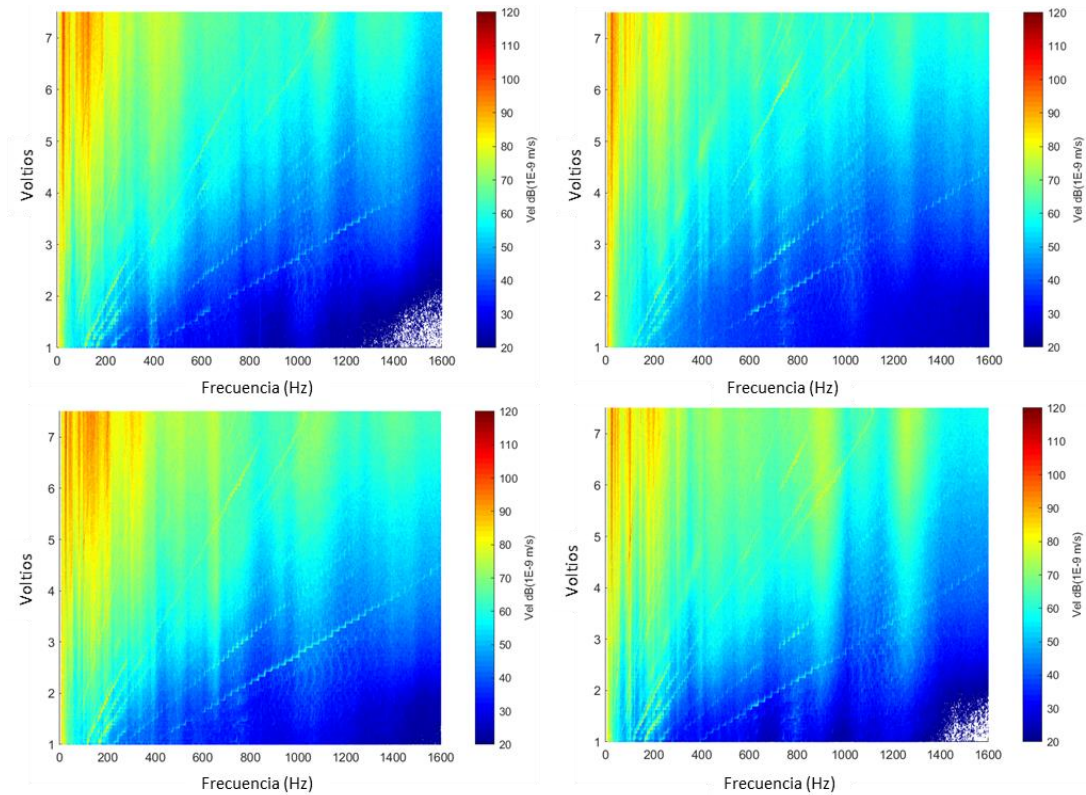


Figura 13.7: *Waterfall* 2D de velocidad. Puntos de la unión voluta - carcasa

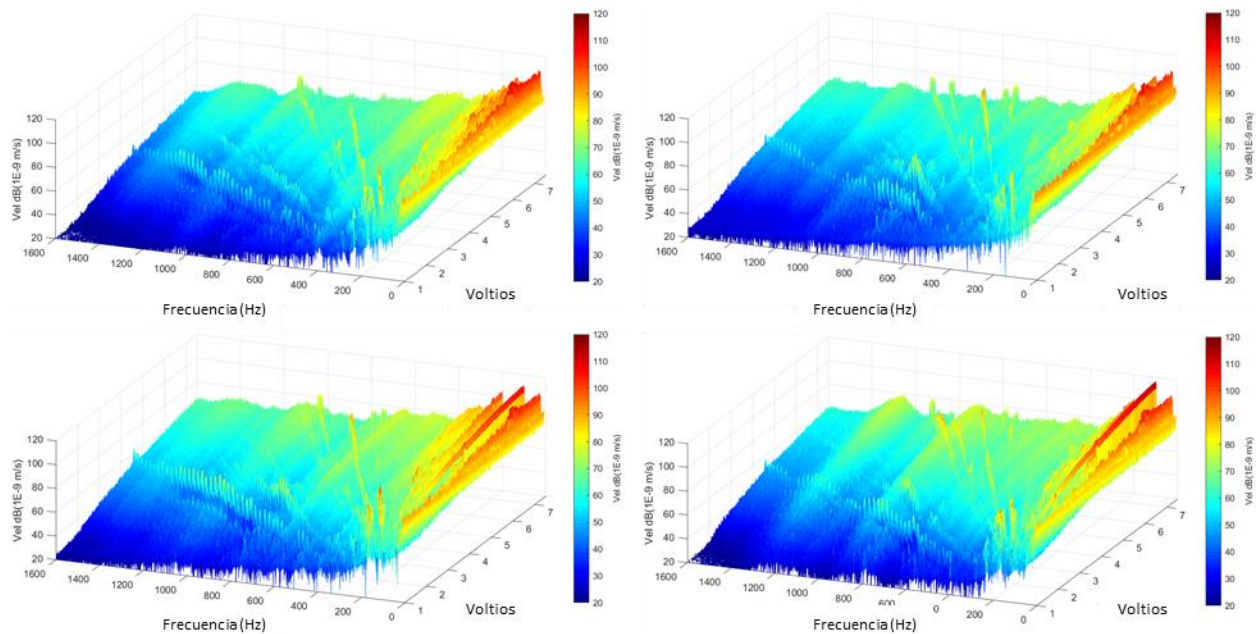


Figura 13.8: *Waterfall* 3D de velocidad. Puntos de la unión voluta - carcasa

13.3.3 Puntos de la placa interior: ejes X e Y

13.3.3.1 Puntos X1 – X2 – X3

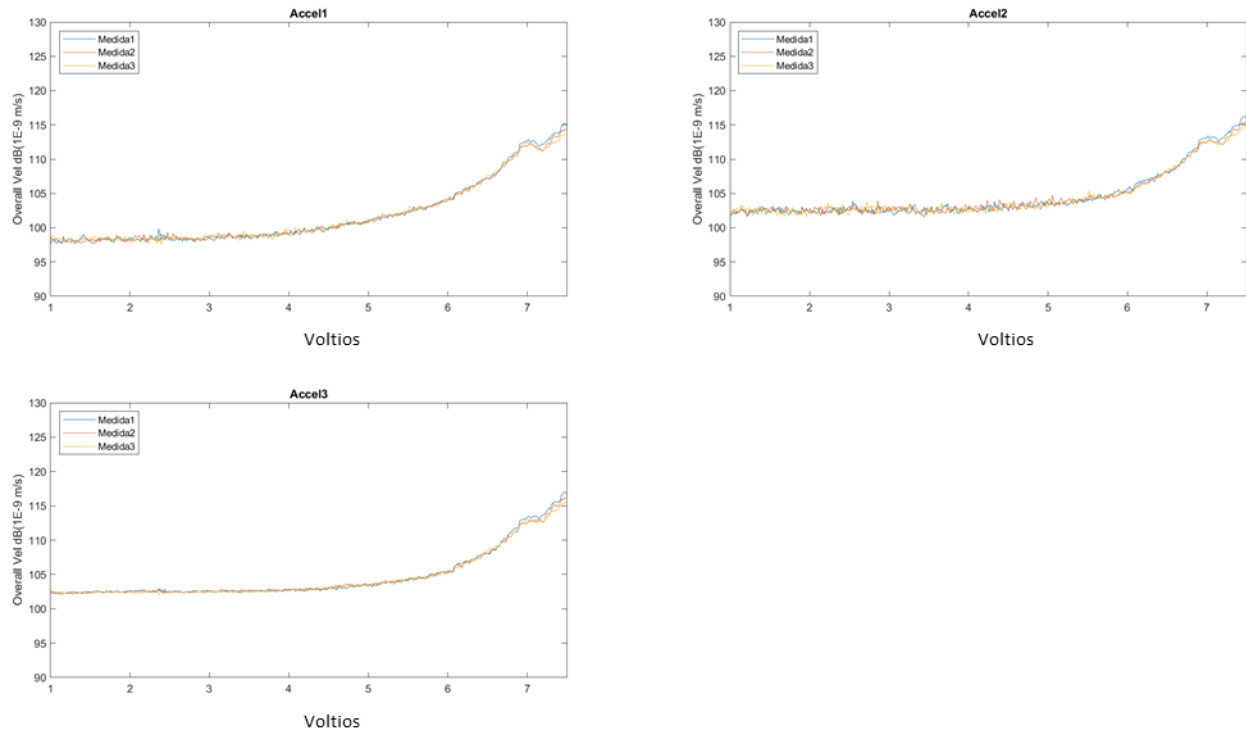


Figura 13.9: Comparación de velocidad *overall* de todas las medidas. Puntos X1 – X2 – X3

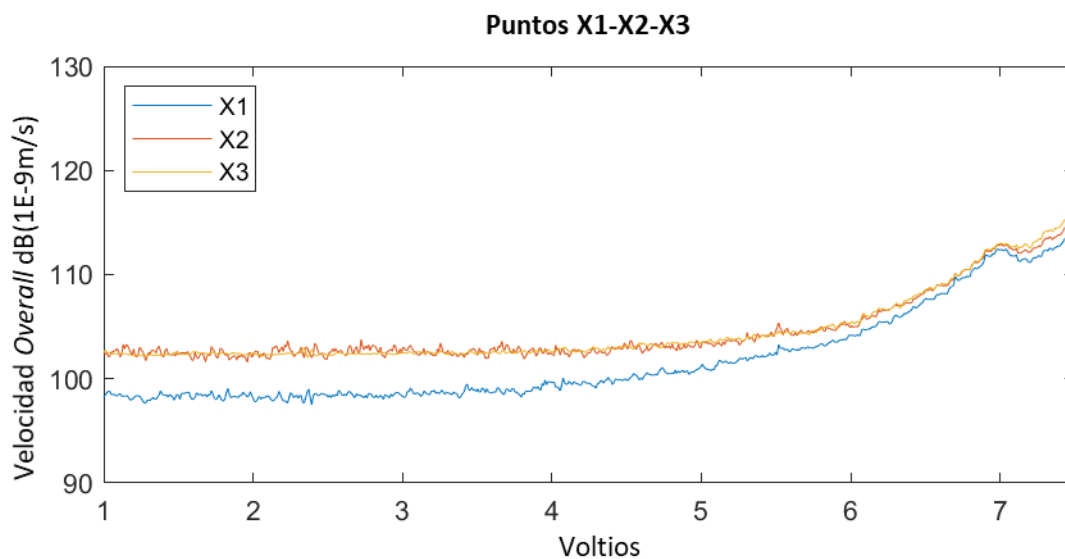


Figura 13.10: Velocidad *overall* de la medida seleccionada. Puntos X1 – X2 – X3

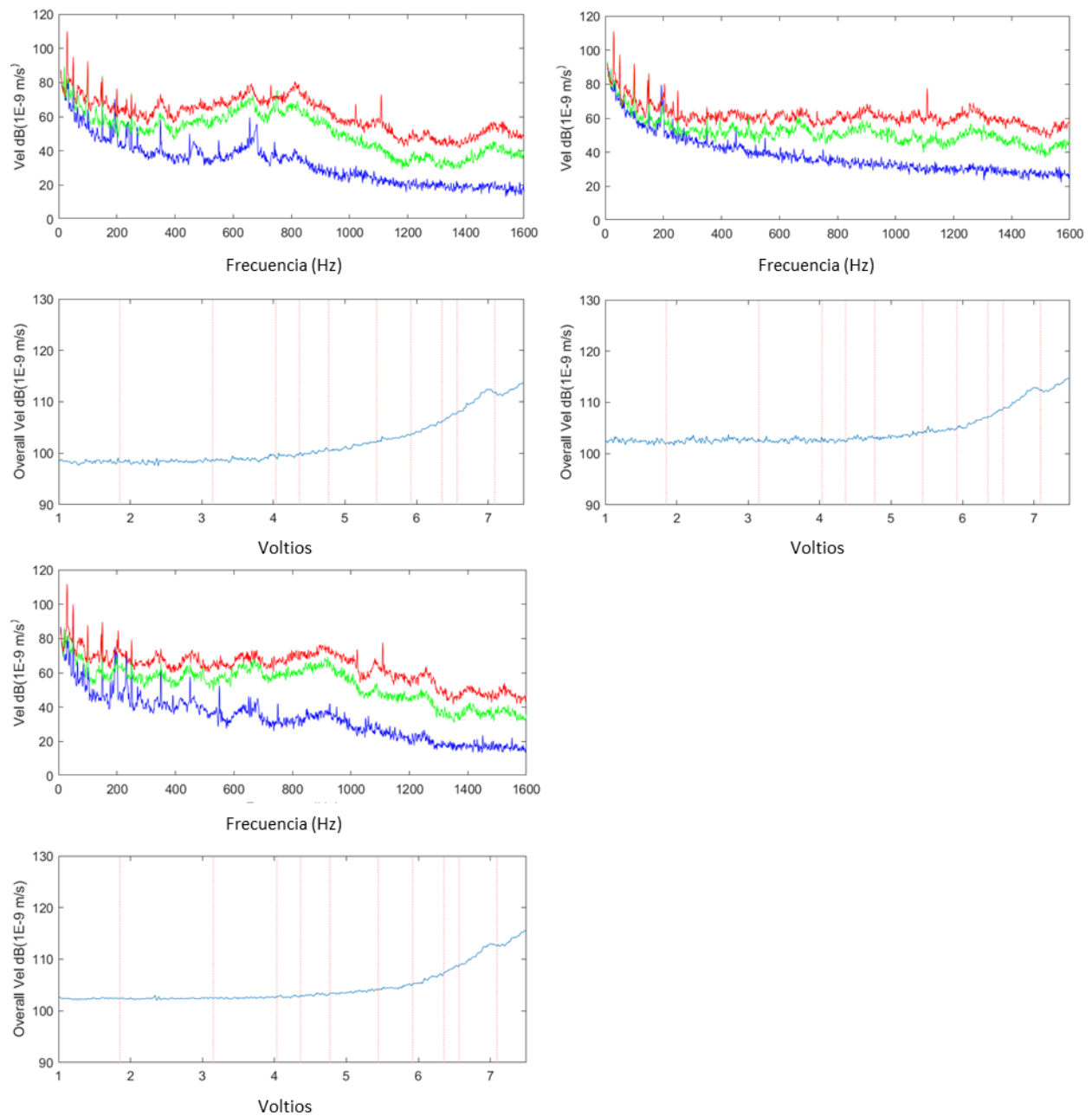
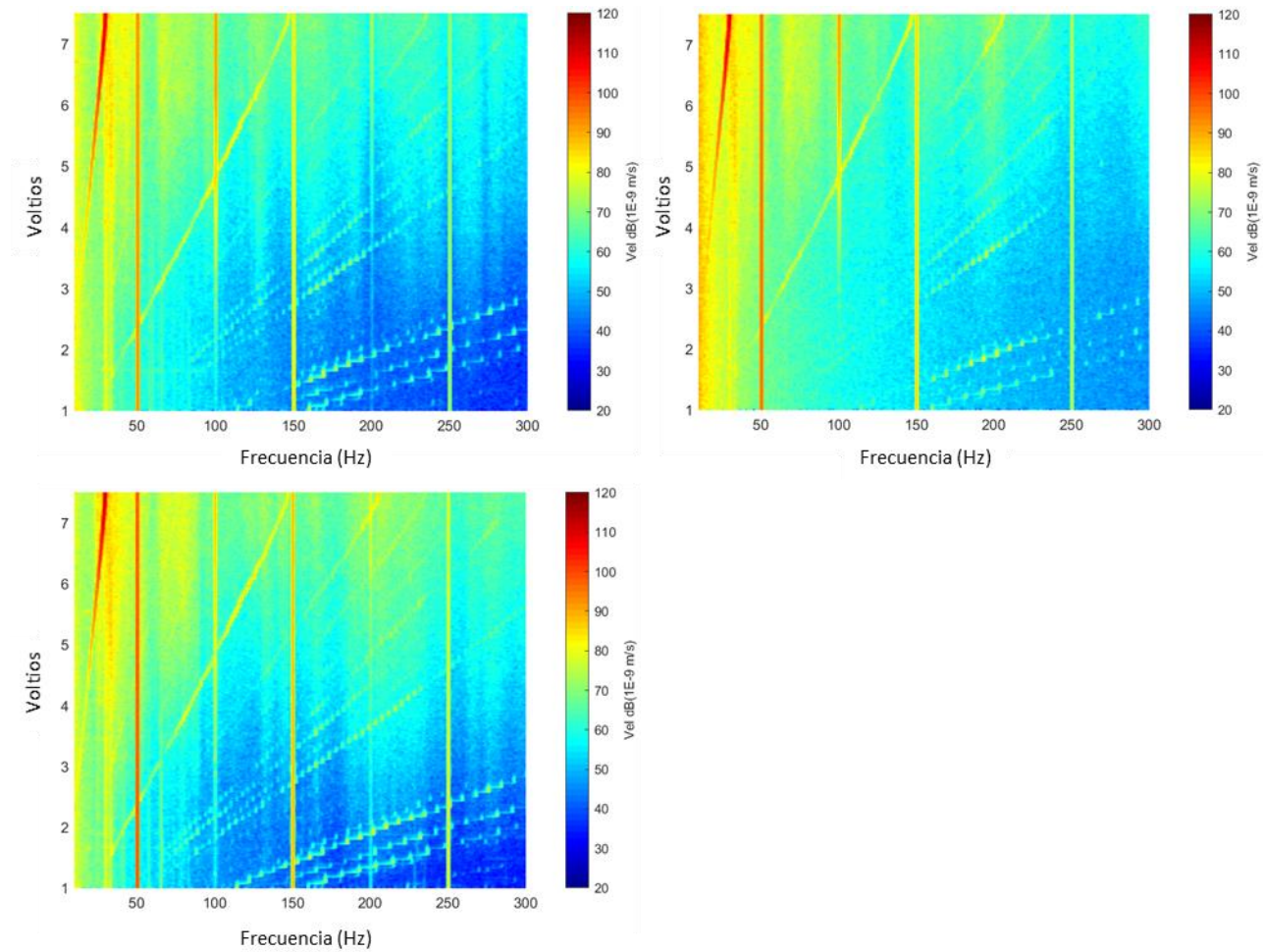
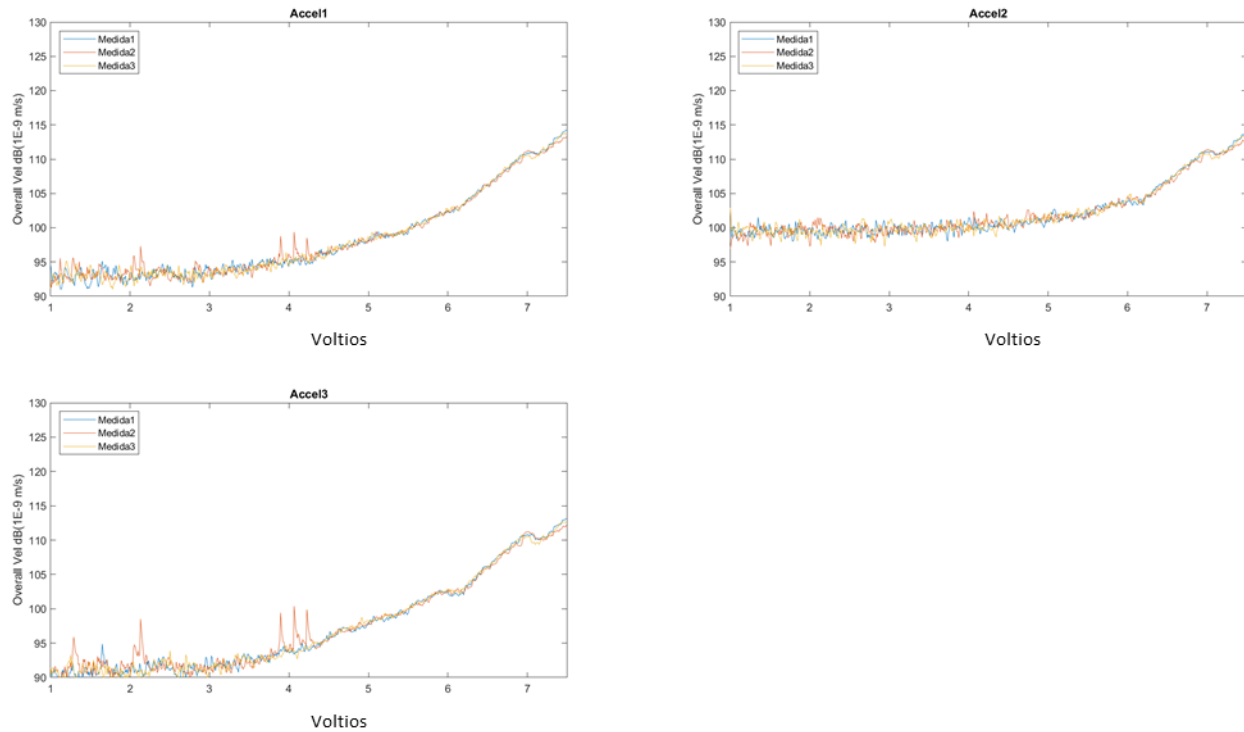
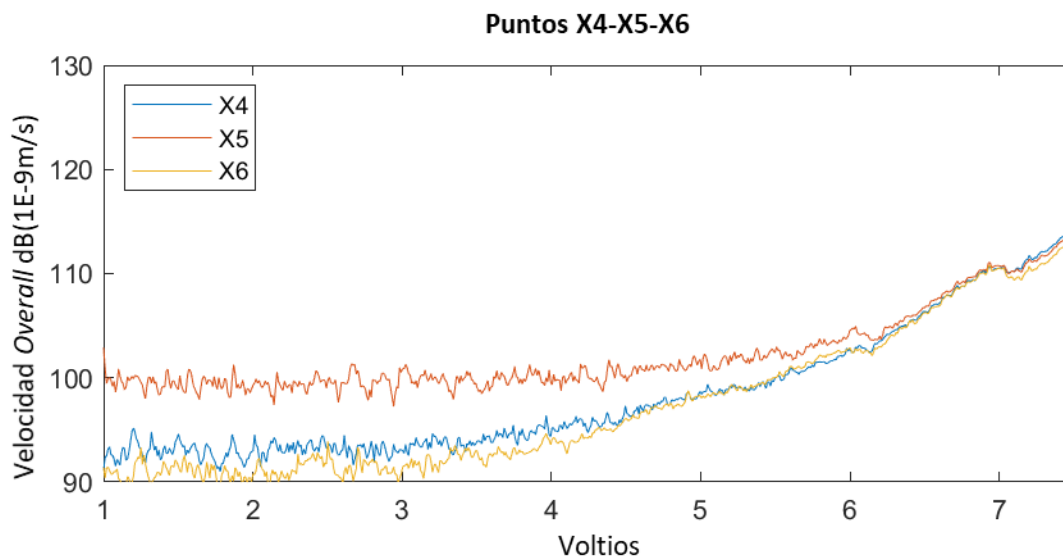


Figura 13.11: Velocidad: 3 niveles y *overall*. Puntos X1 – X2 – X3

Figura 13.12: *Waterfall* 2D de velocidad. Puntos X1 – X2 – X3

13.3.3.2 Puntos X4 – X5 – X6

Figura 13.13: Comparación de velocidad *overall* de todas las medidas. Puntos X4 – X5 – X6Figura 13.14: Velocidad *overall* de la medida seleccionada. Puntos X4 – X5 – X6

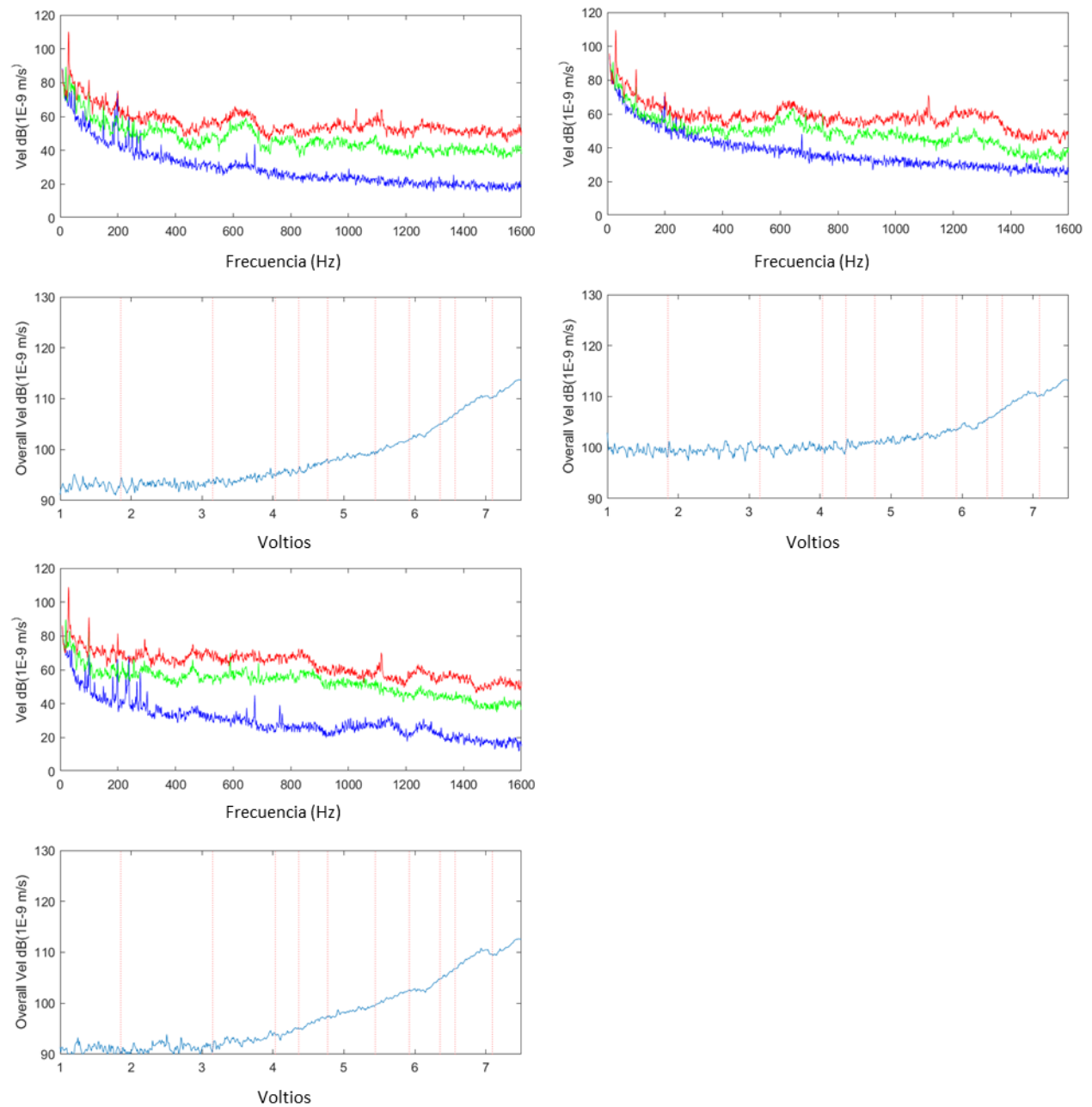
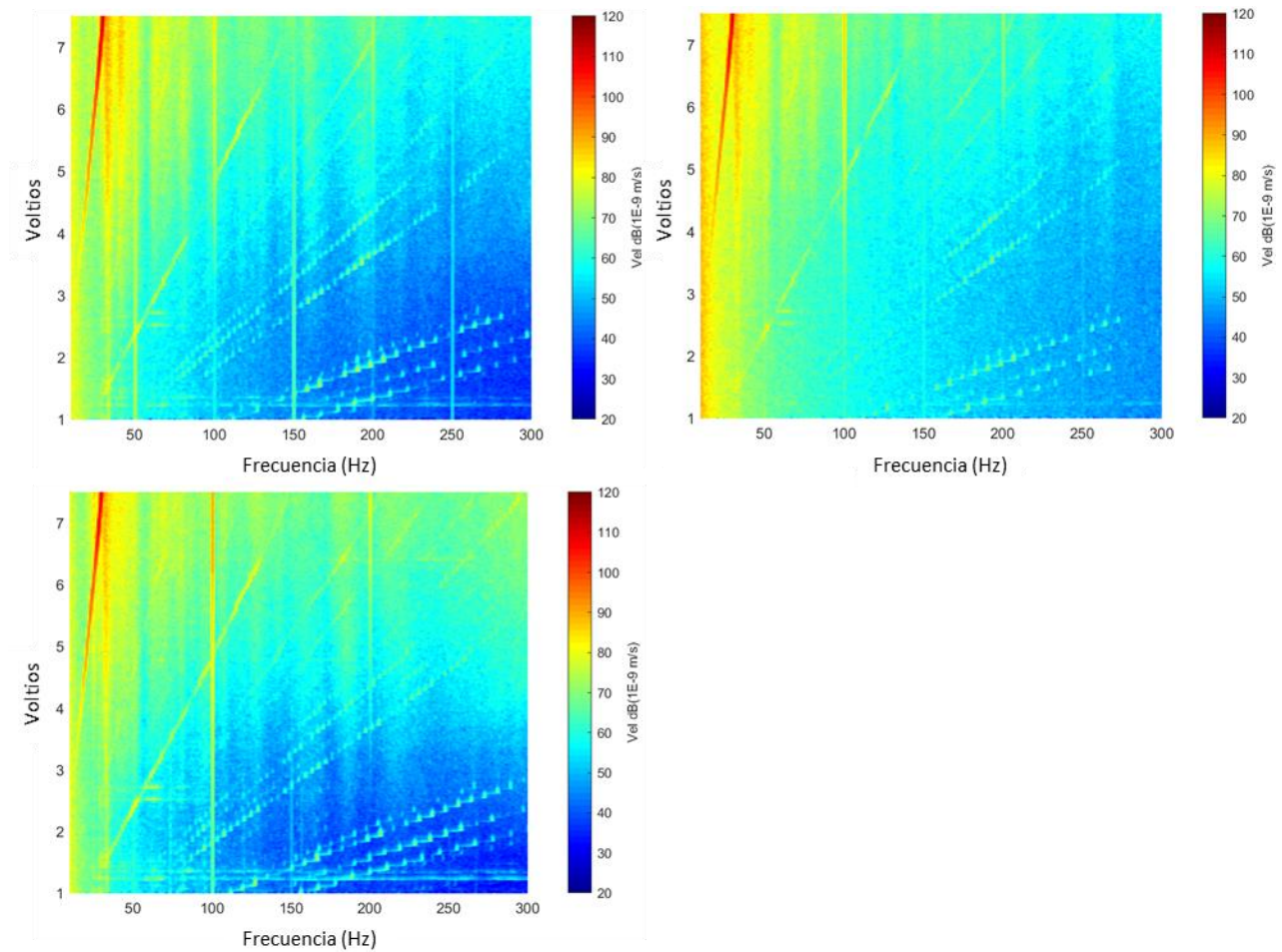
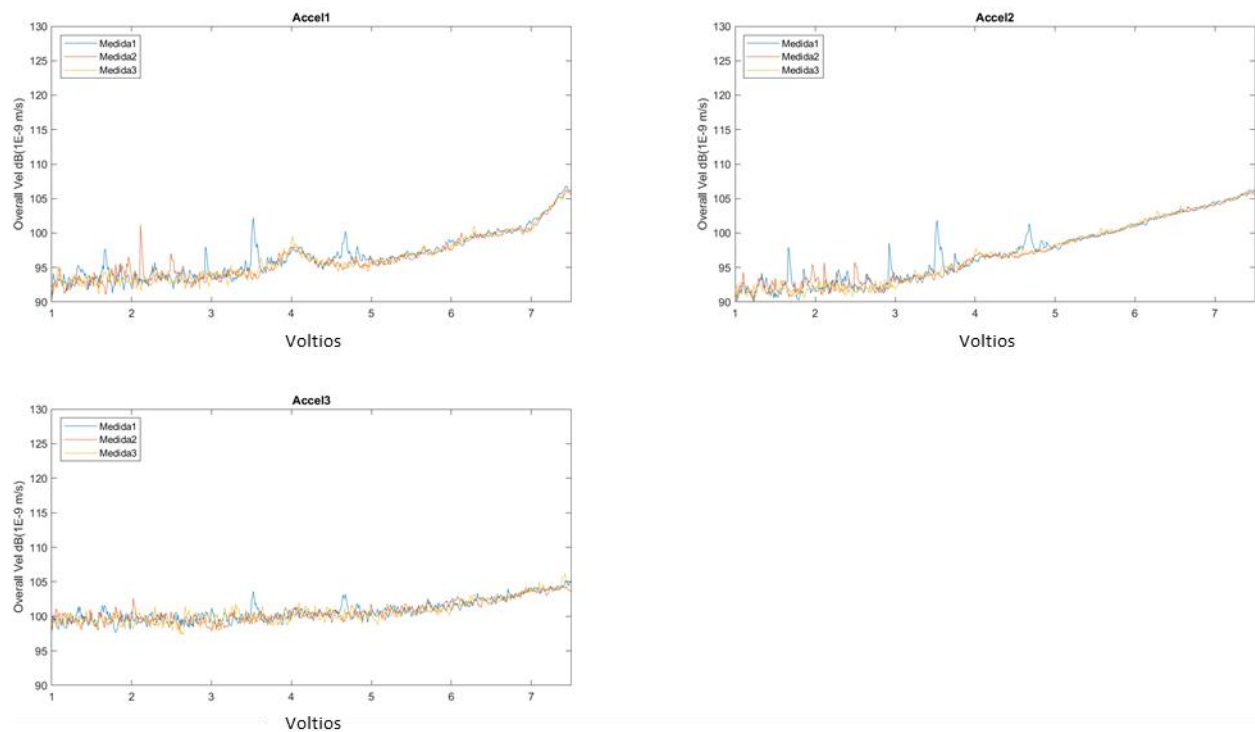
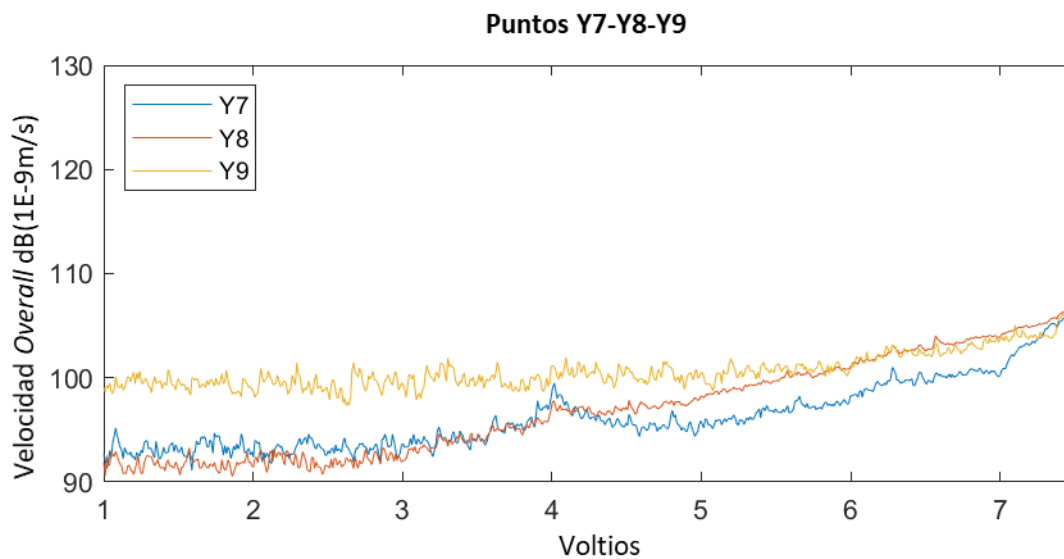


Figura 13.15: Velocidad: 3 niveles y *overall*. Puntos X4 – X5 – X6

Figura 13.16: *Waterfall* 2D de velocidad. Puntos X4 – X5 – X6

13.3.3.3 Puntos Y7– Y8 – Y9

Figura 13.17: Comparación de velocidad *overall* de todas las medidas. Puntos Y7 – Y8 – Y9Figura 13.18: Velocidad *overall* de la medida seleccionada. Puntos Y7 – Y8 – Y9

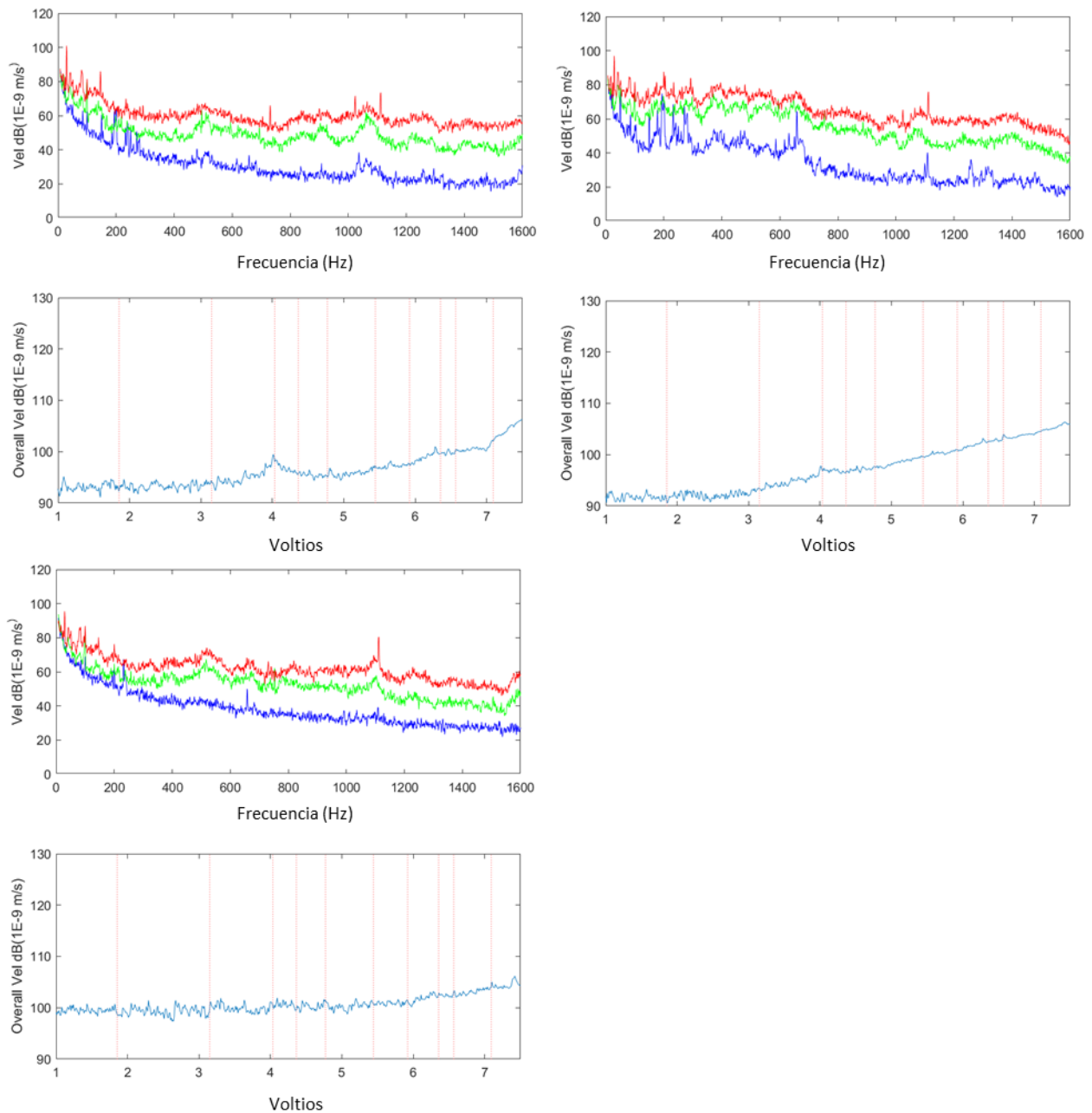
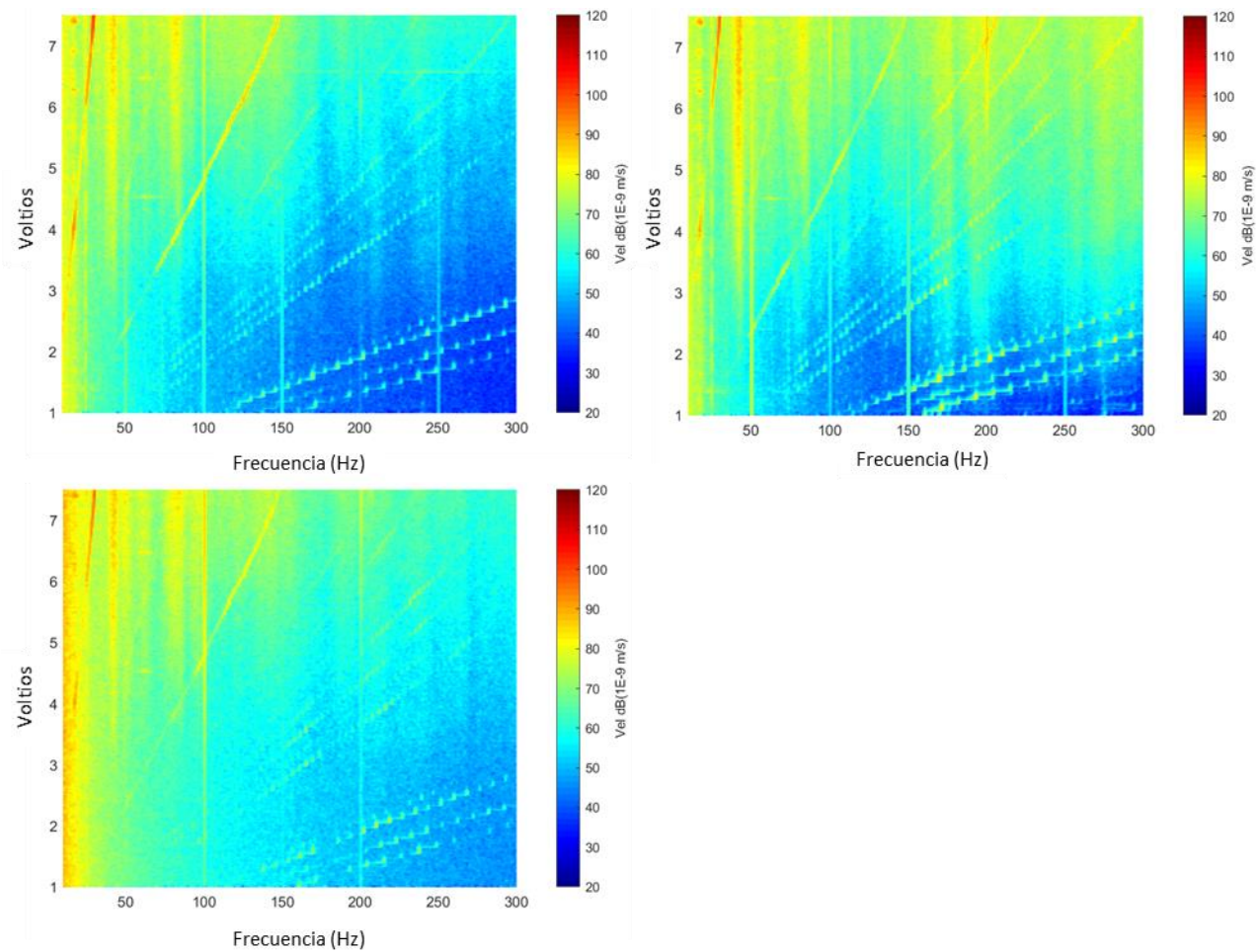
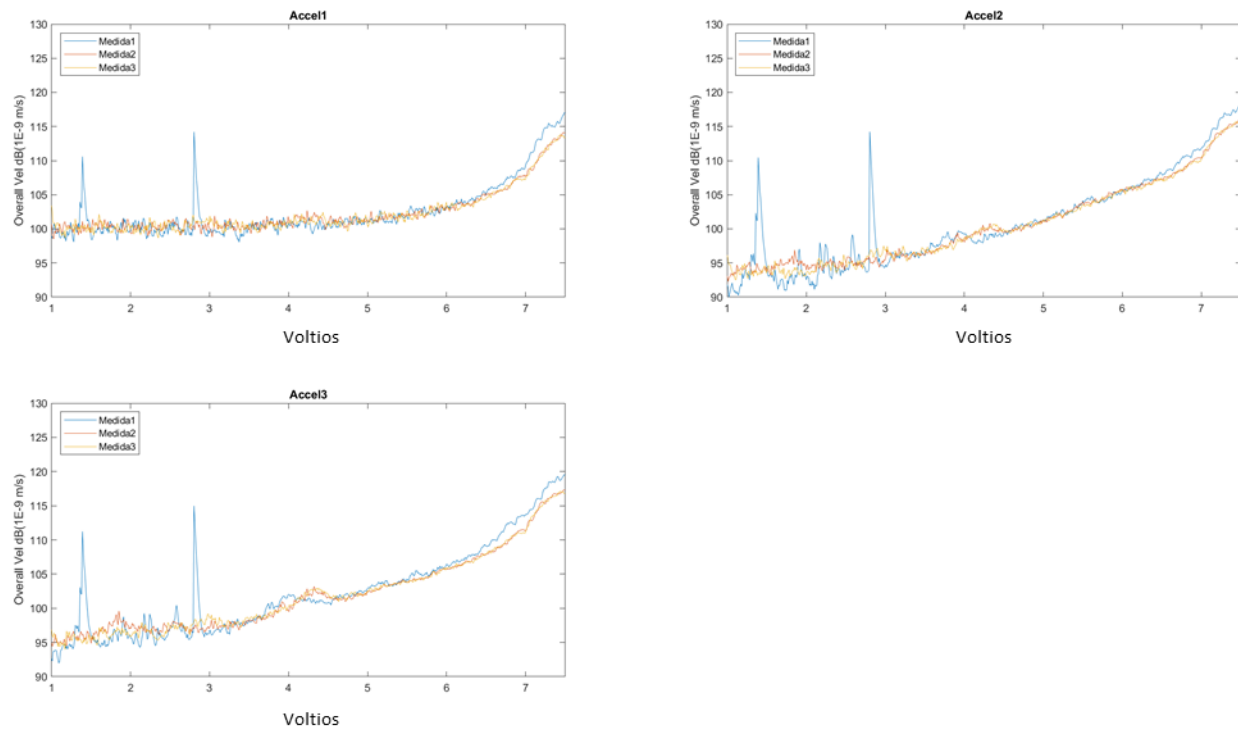
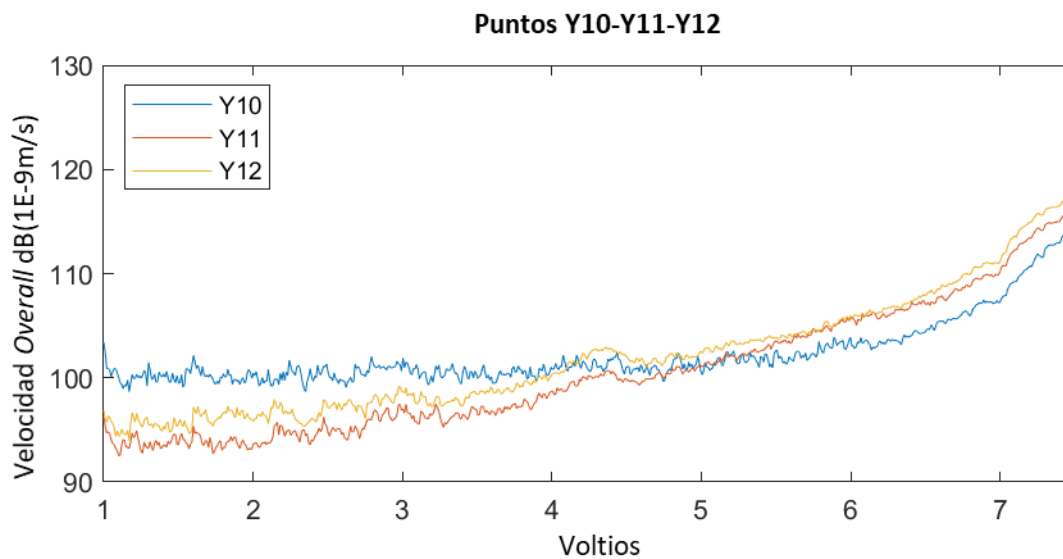
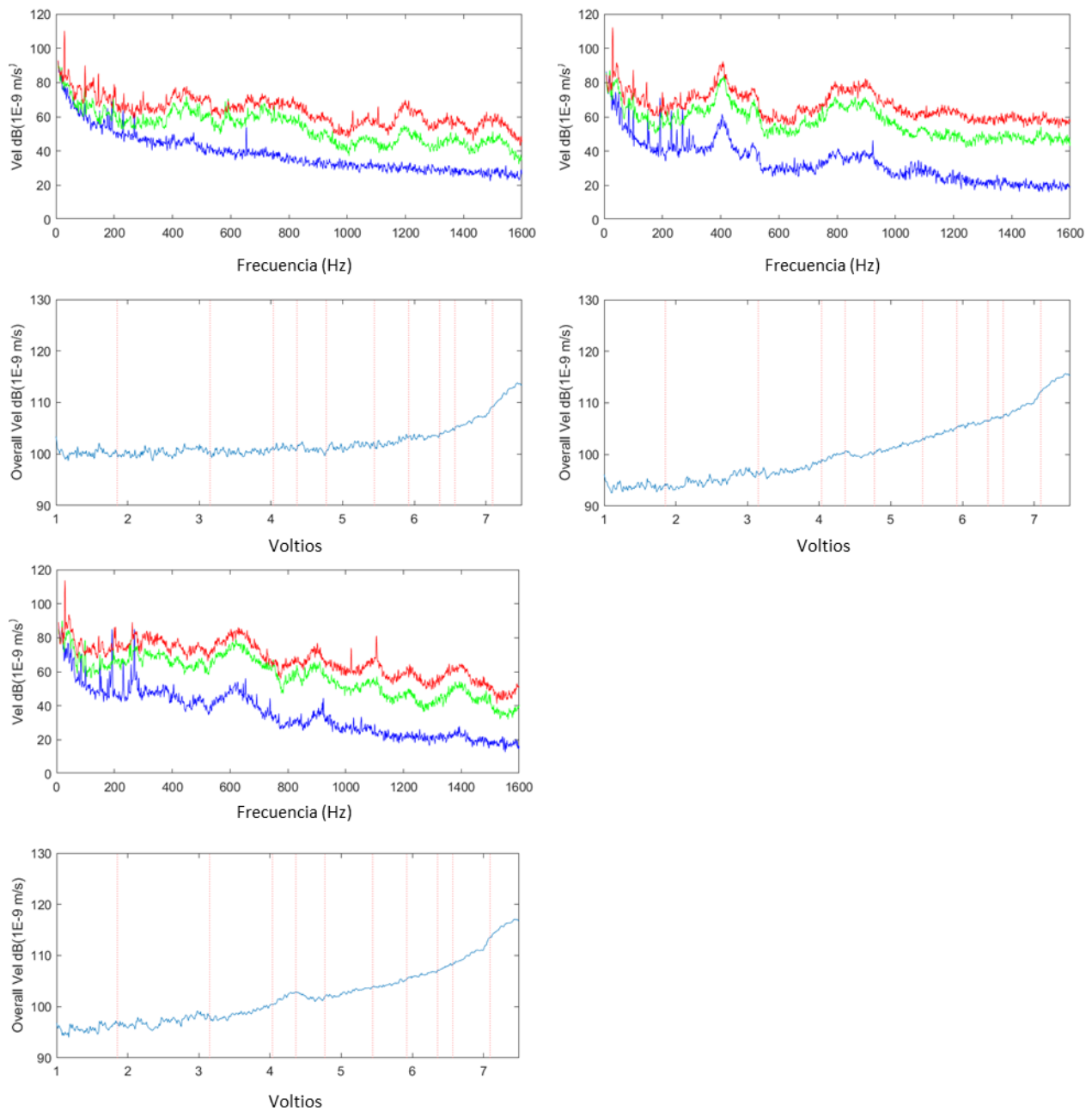


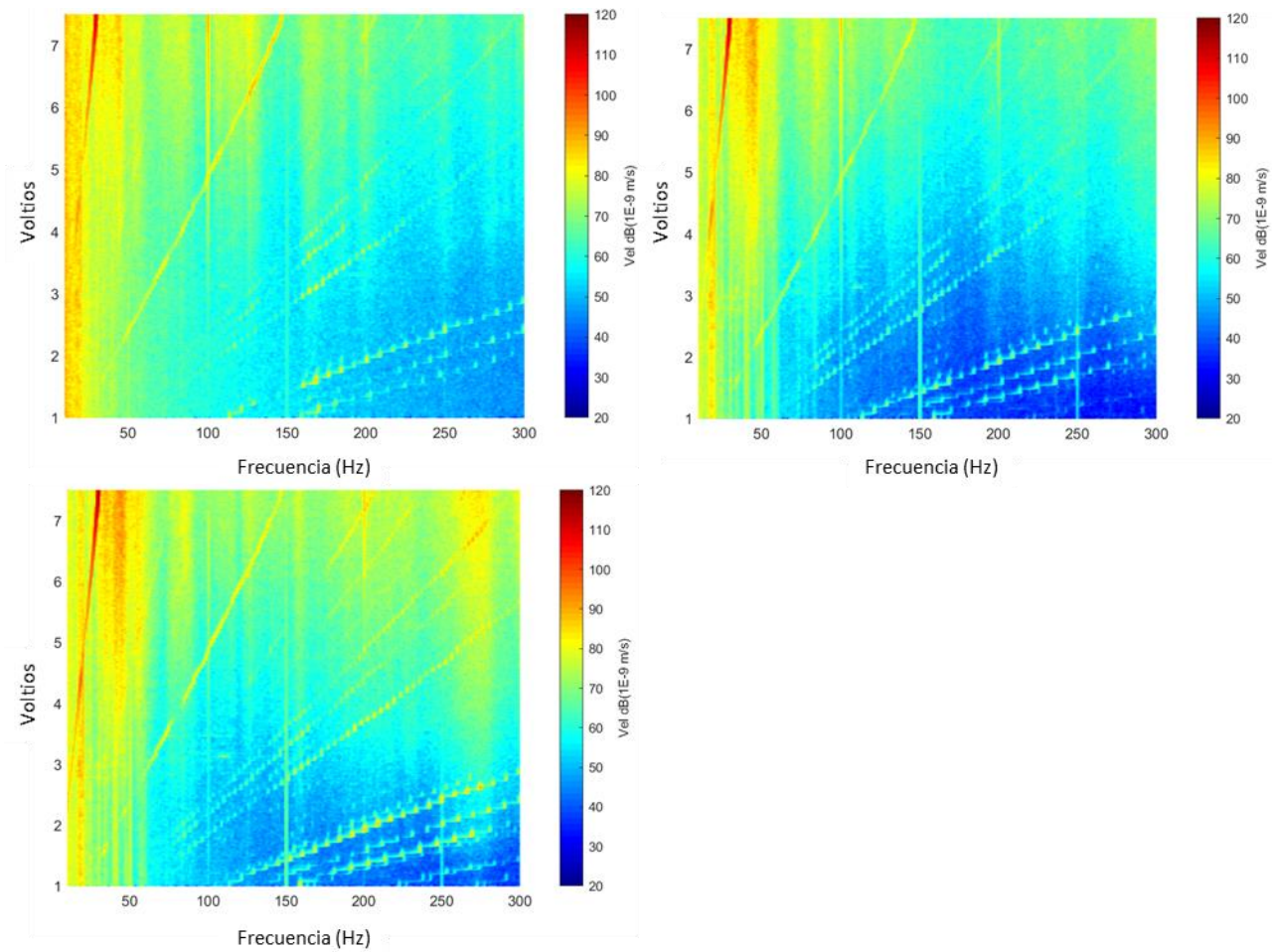
Figura 13.19: Velocidad: 3 niveles y *overall*. Puntos Y7 – Y8 – Y9

Figura 13.20: *Waterfall* 2D de velocidad. Puntos Y7 – Y8 – Y9

13.3.3.4 Puntos Y10 – Y11 – Y12

Figura 13.21: Comparación de velocidad *overall* de todas las medidas. Puntos Y10 – Y11 – Y12Figura 13.22: Velocidad *overall* de la medida seleccionada. Puntos Y10 – Y11 – Y12

Figura 13.23: Velocidad: 3 niveles y *overall*. Puntos Y10 – Y11 – Y12

Figura 13.24: *Waterfall* 2D de velocidad. Puntos Y10 – Y11 – Y12

13.3.4 Puntos de la placa interior: eje Z

13.3.4.1 Puntos Z1 – Z2 – Z3

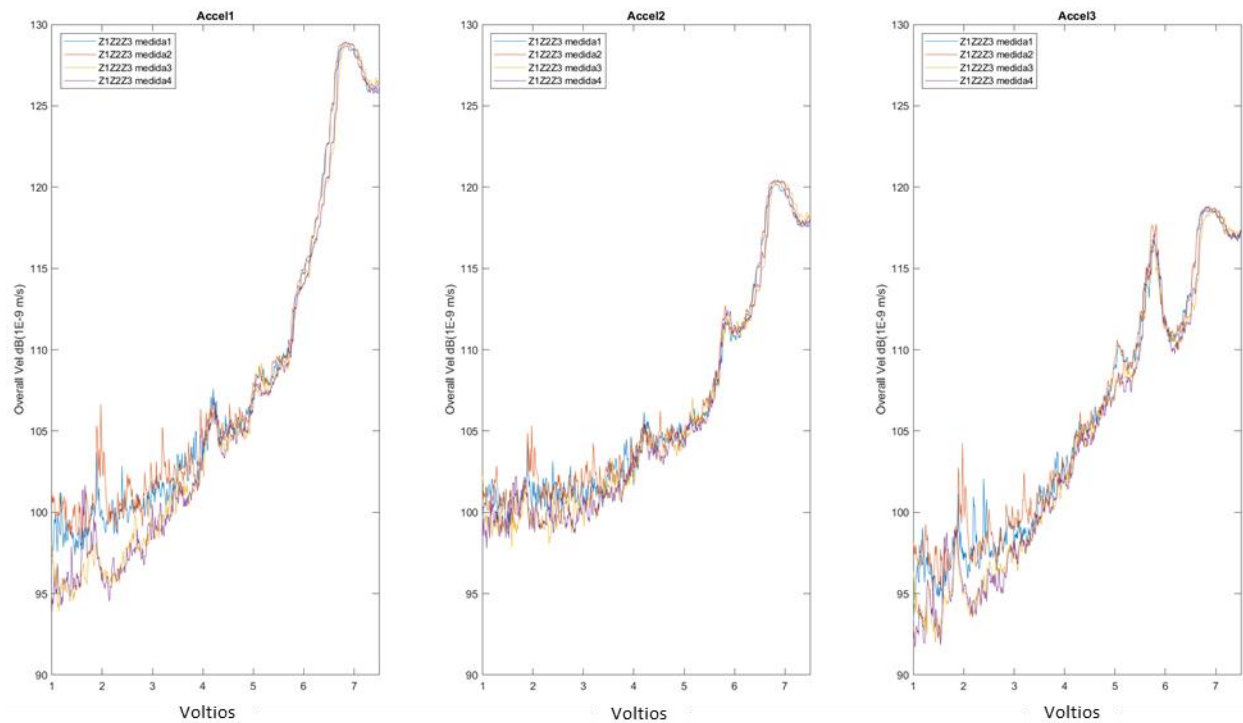


Figura 13.25: Comparación de velocidad *overall* de todas las medidas. Puntos Z1 – Z2 – Z3

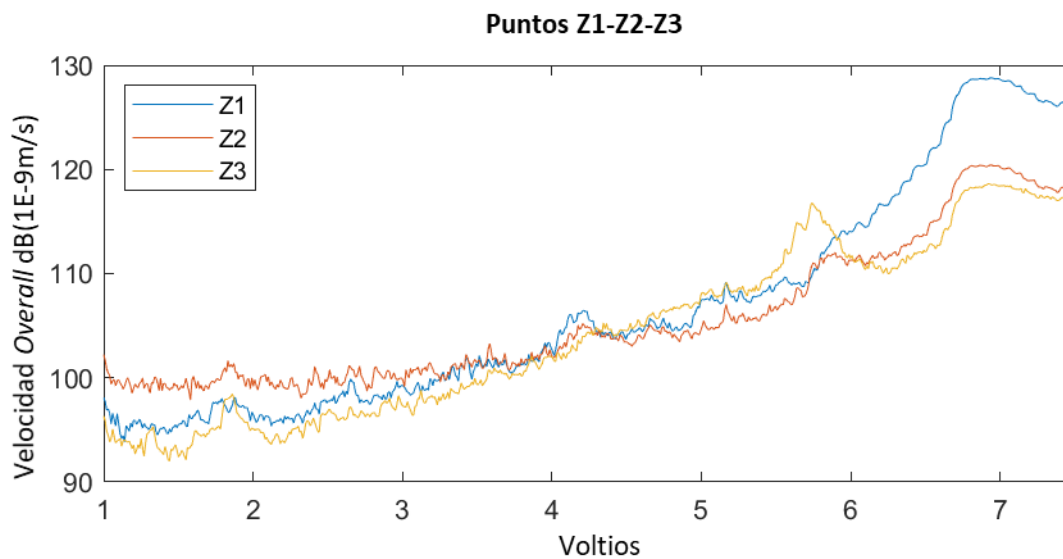


Figura 13.26: Velocidad *overall* de la medida seleccionada. Puntos Z1 – Z2 – Z3

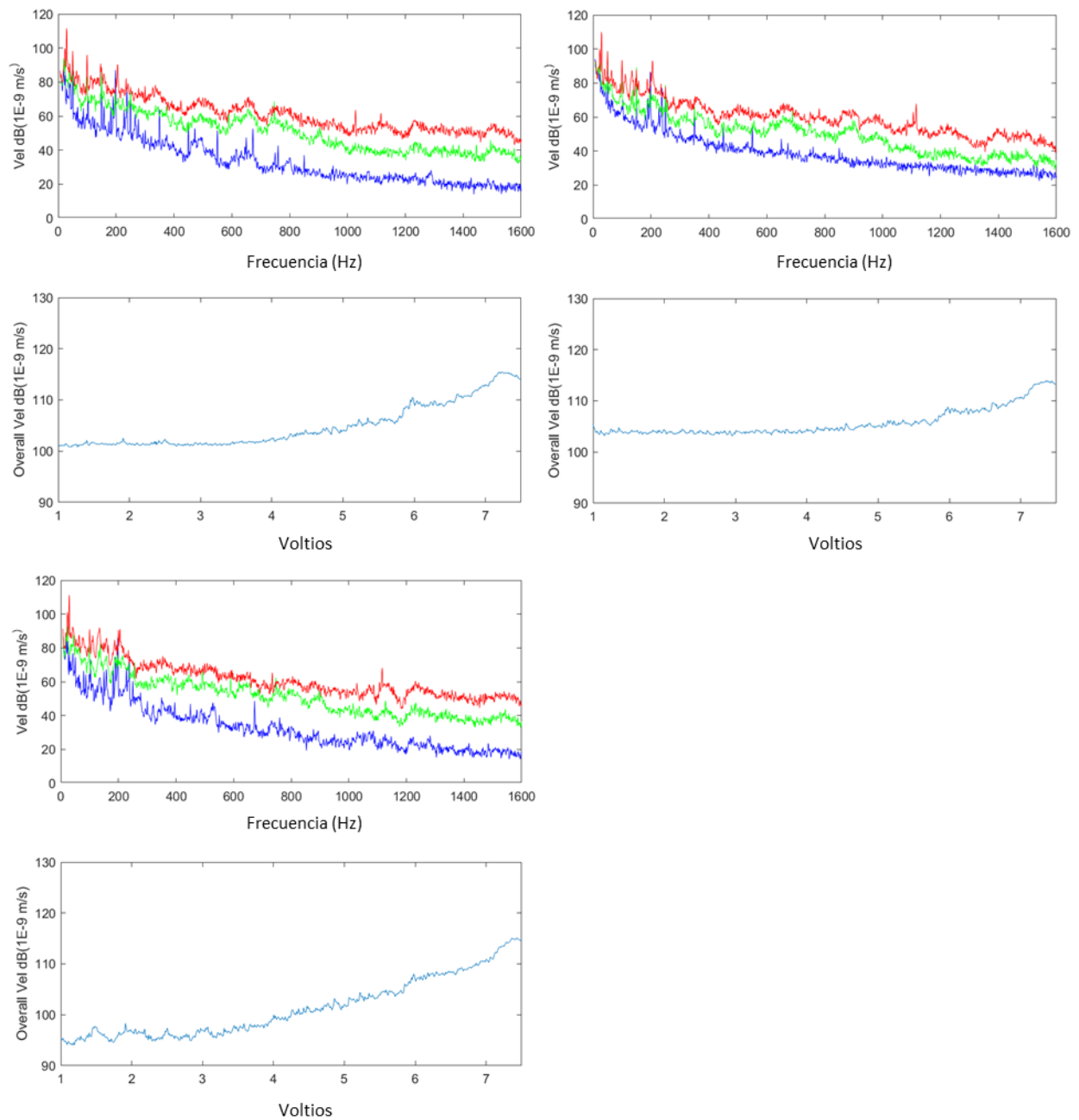
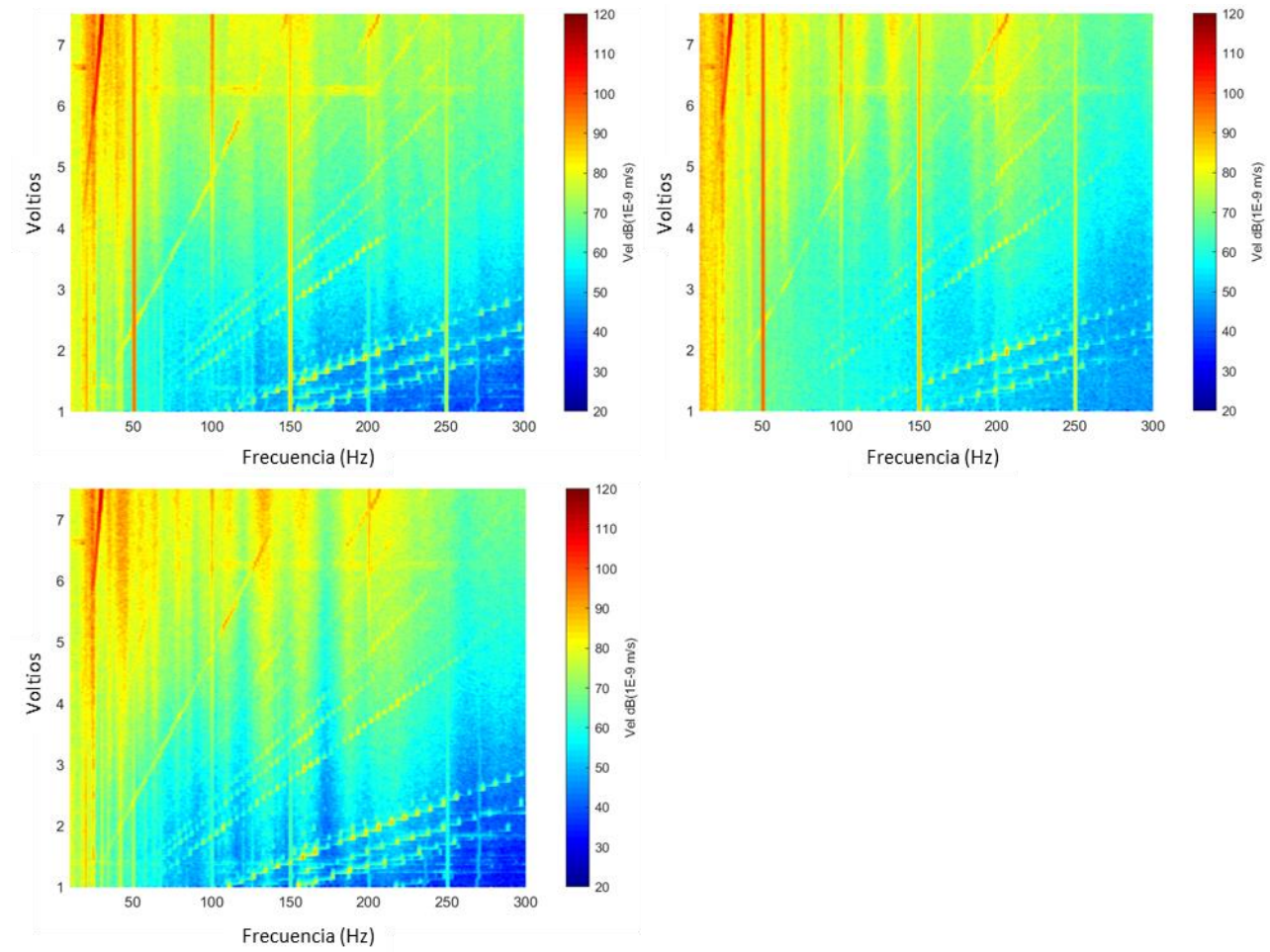
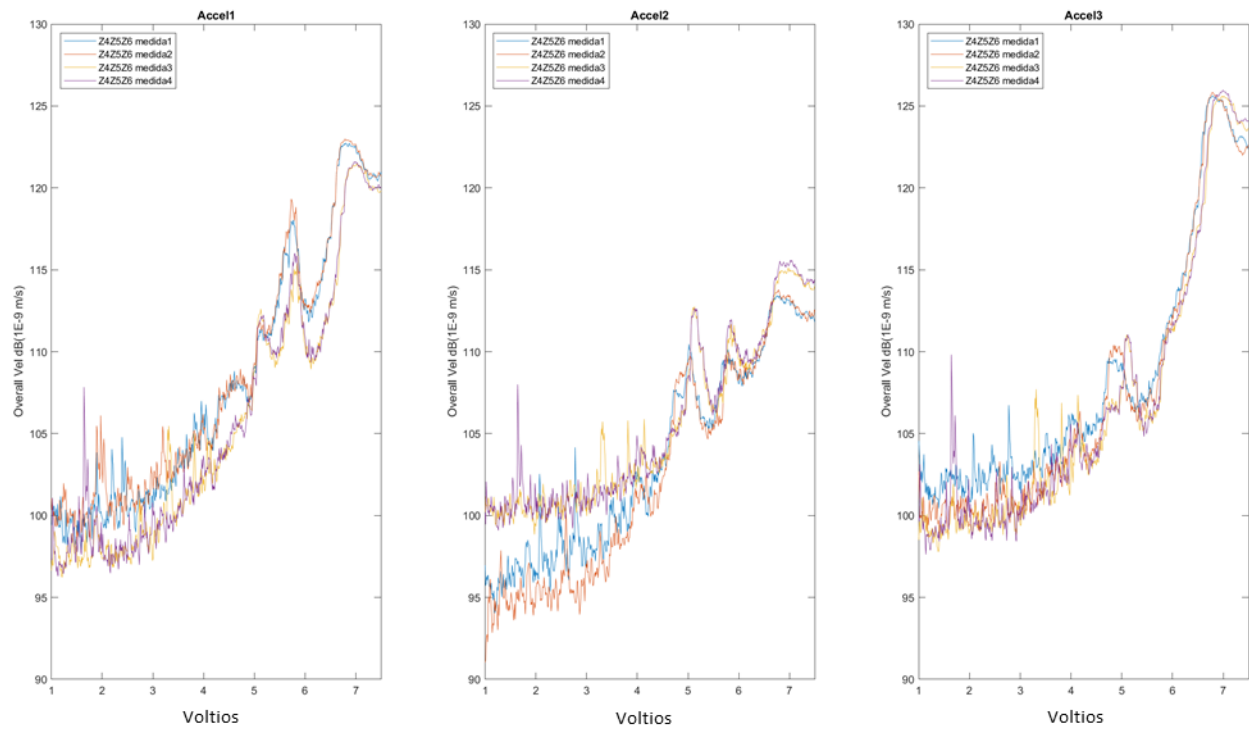
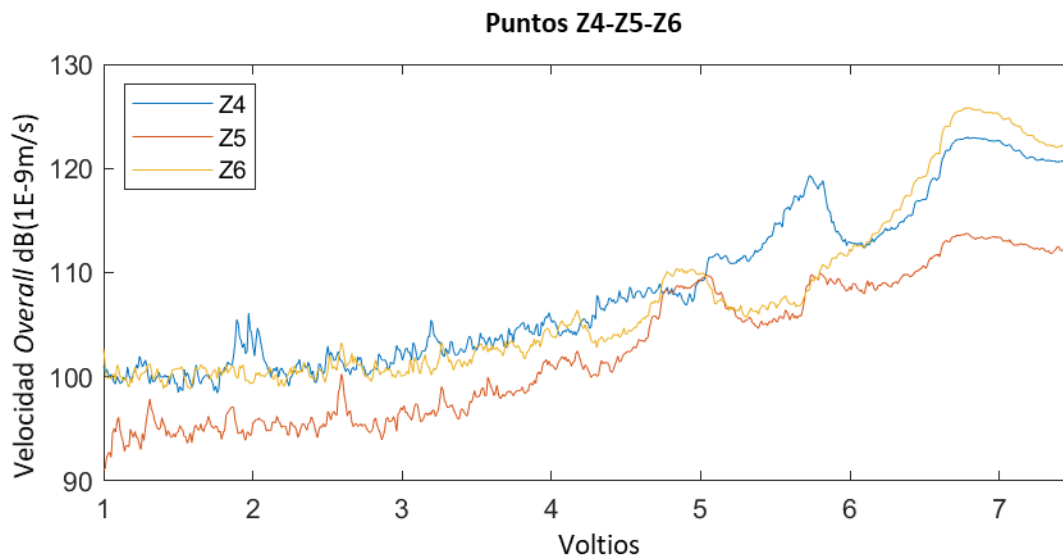


Figura 13.27: Velocidad: 3 niveles y *overall*. Puntos Z1 – Z2 – Z3

Figura 13.28: *Waterfall* 2D de velocidad. Puntos Z1 – Z2 – Z3

13.3.4.2 Puntos Z4 – Z5 – Z6

Figura 13.29: Comparación de velocidad *overall* de todas las medidas. Puntos Z4 – Z5 – Z6Figura 13.30: Velocidad *overall* de la medida seleccionada. Puntos Z4 – Z5 – Z6

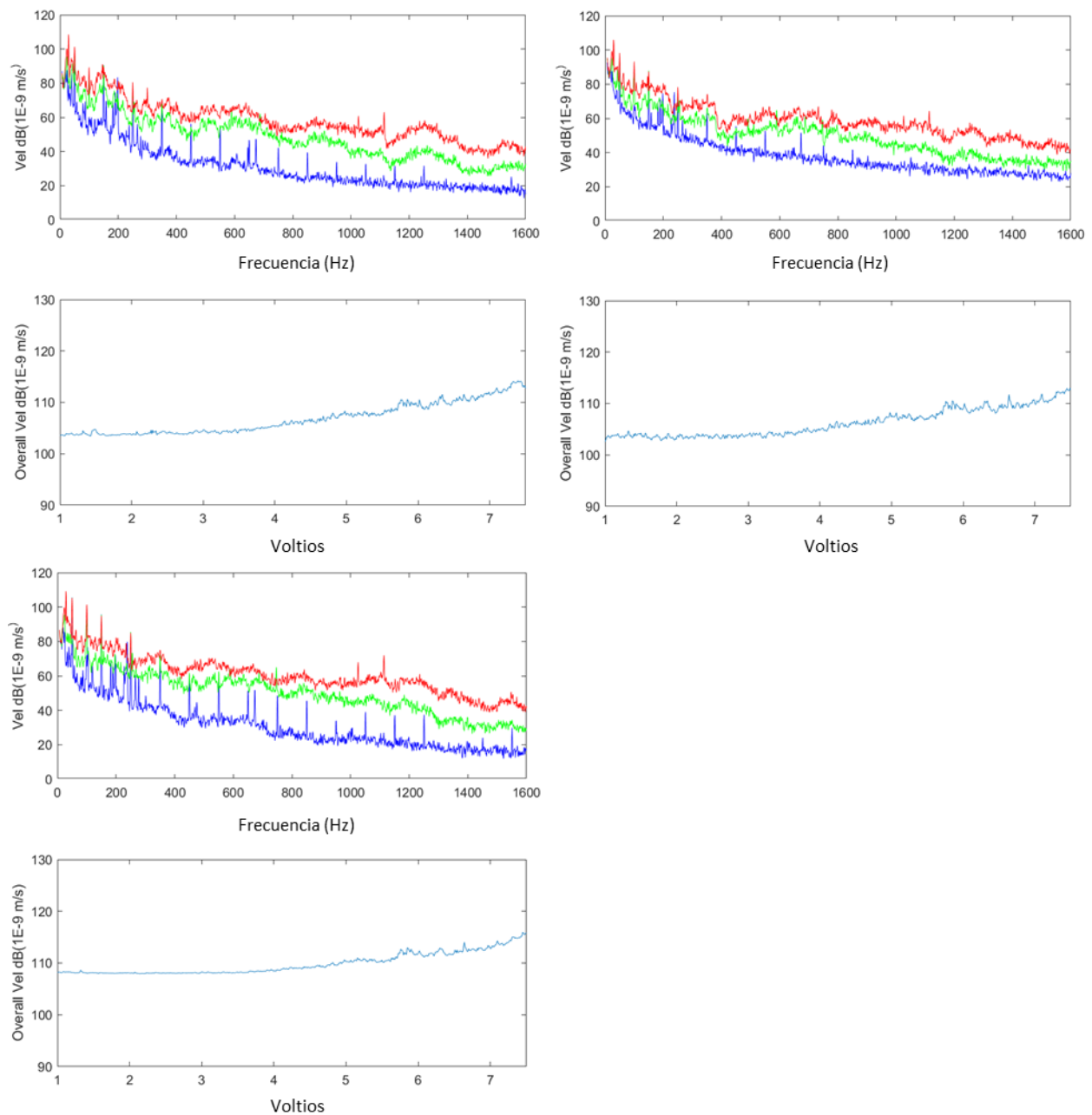
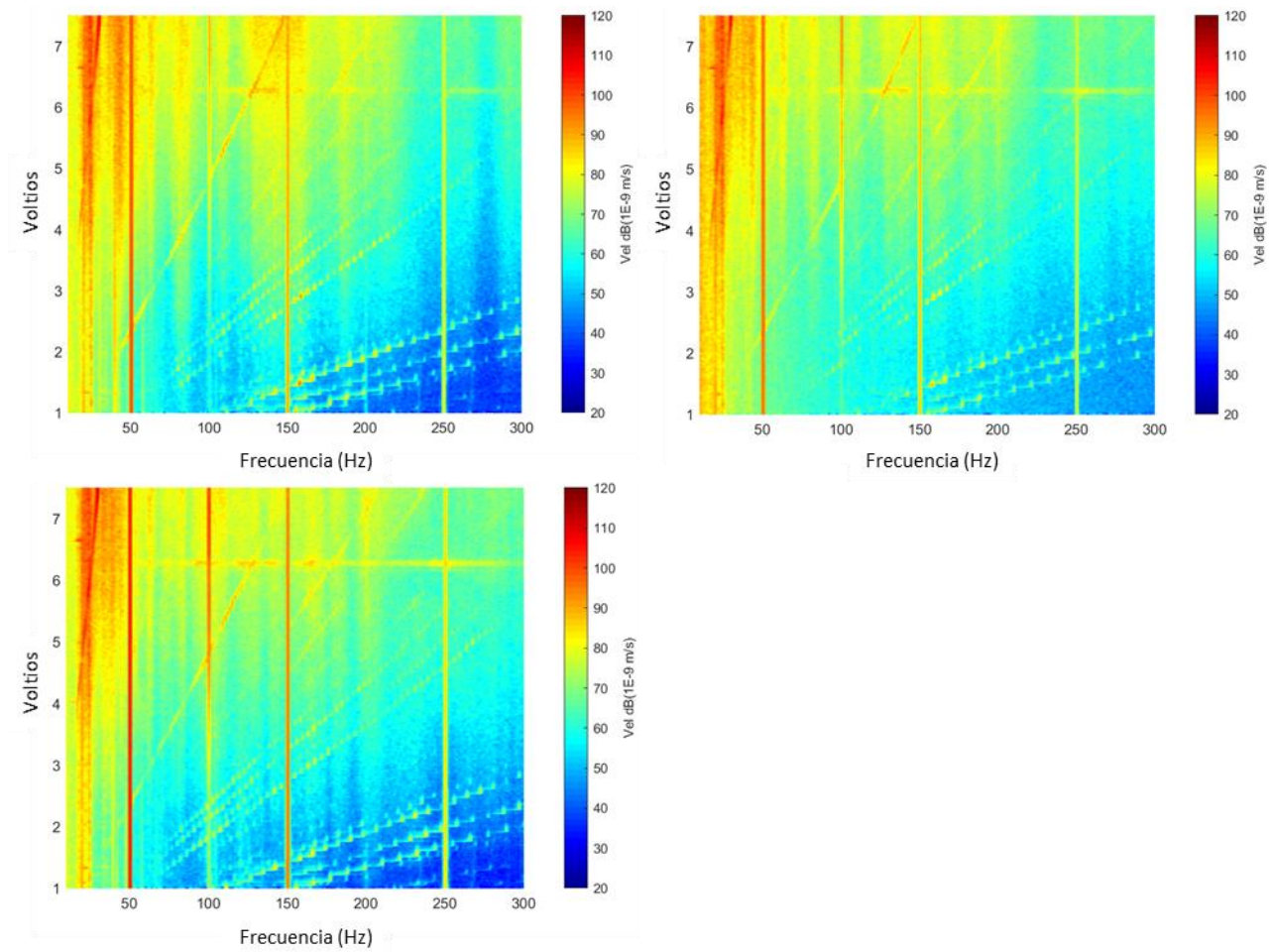
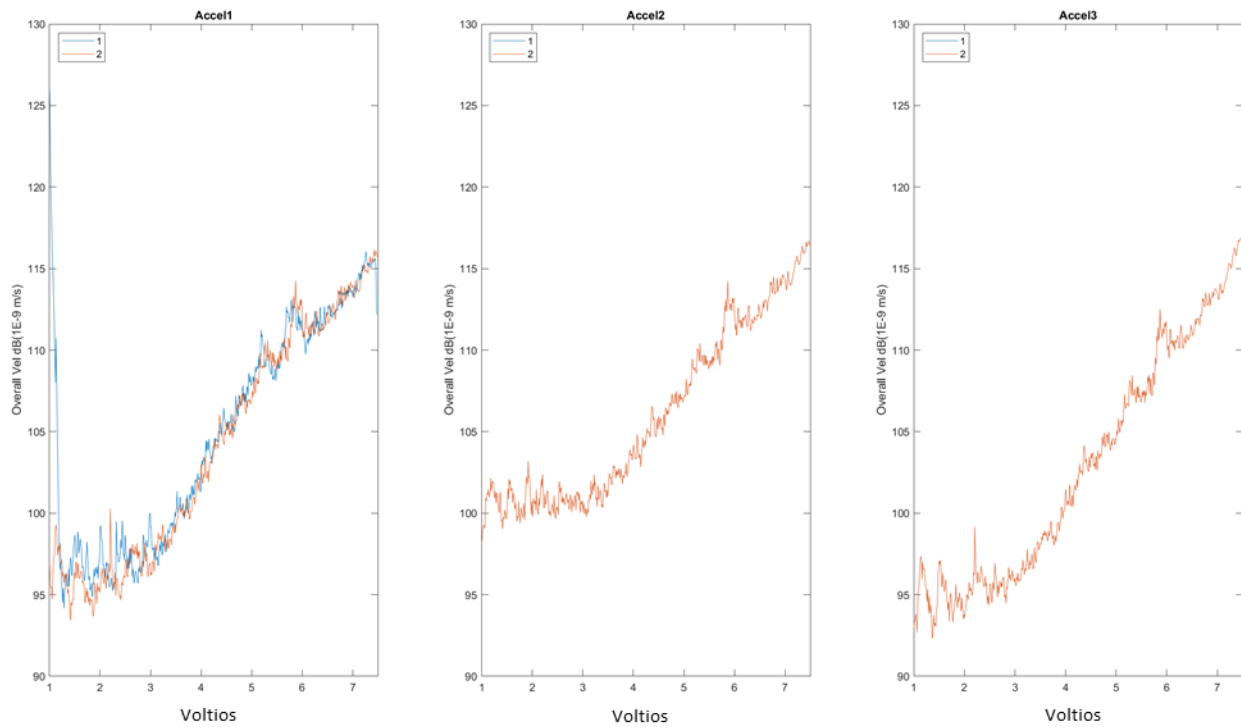
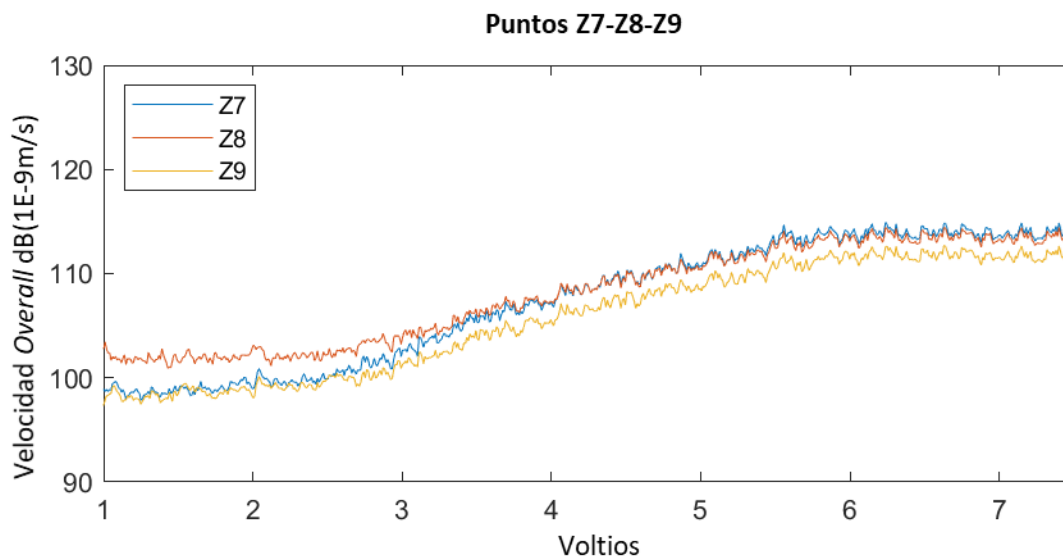
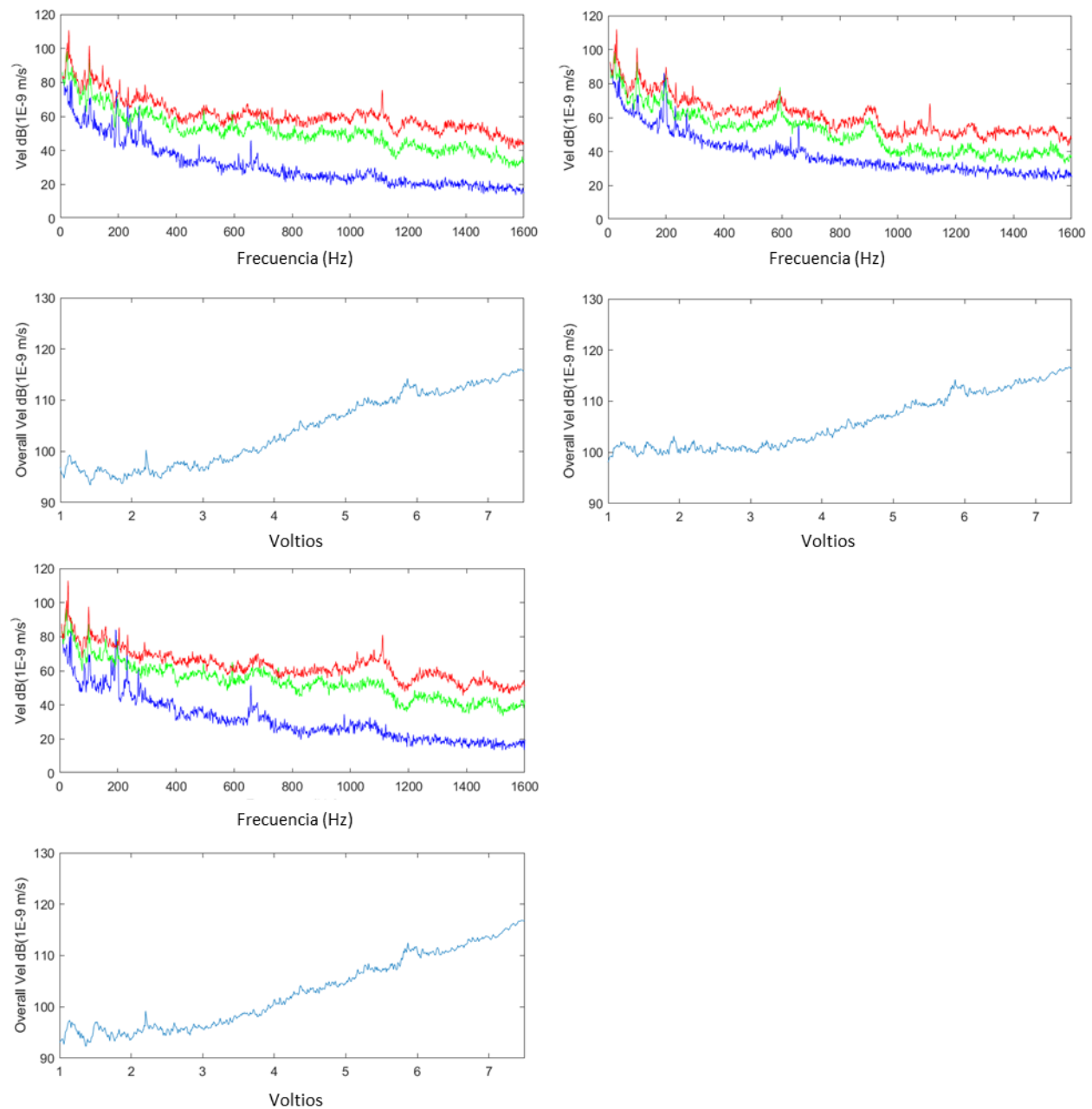


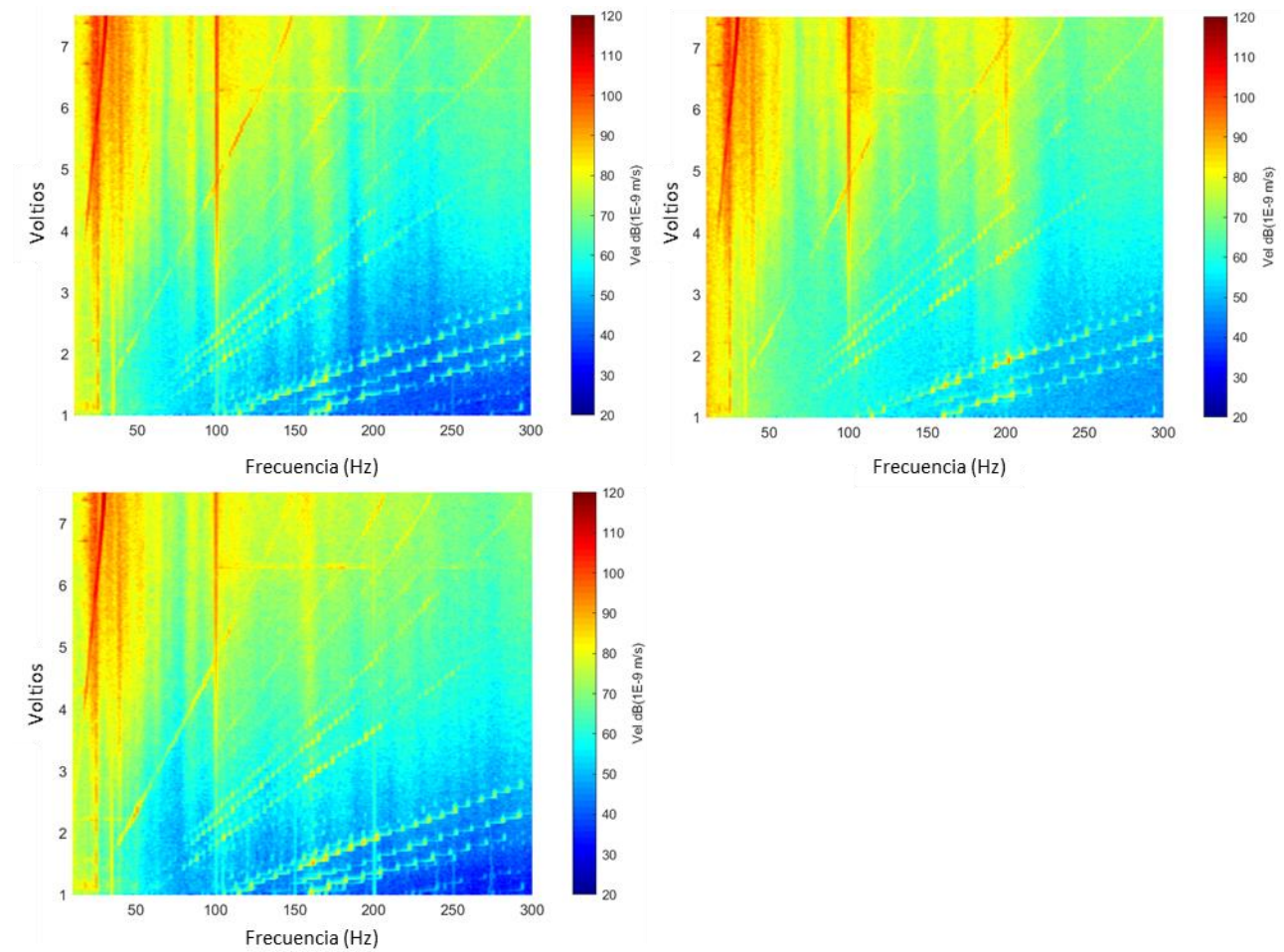
Figura 13.31: Velocidad: 3 niveles y *overall*. Puntos Z4 – Z5 – Z6

Figura 13.32: *Waterfall* 2D de velocidad. Puntos Z4 – Z5 – Z6

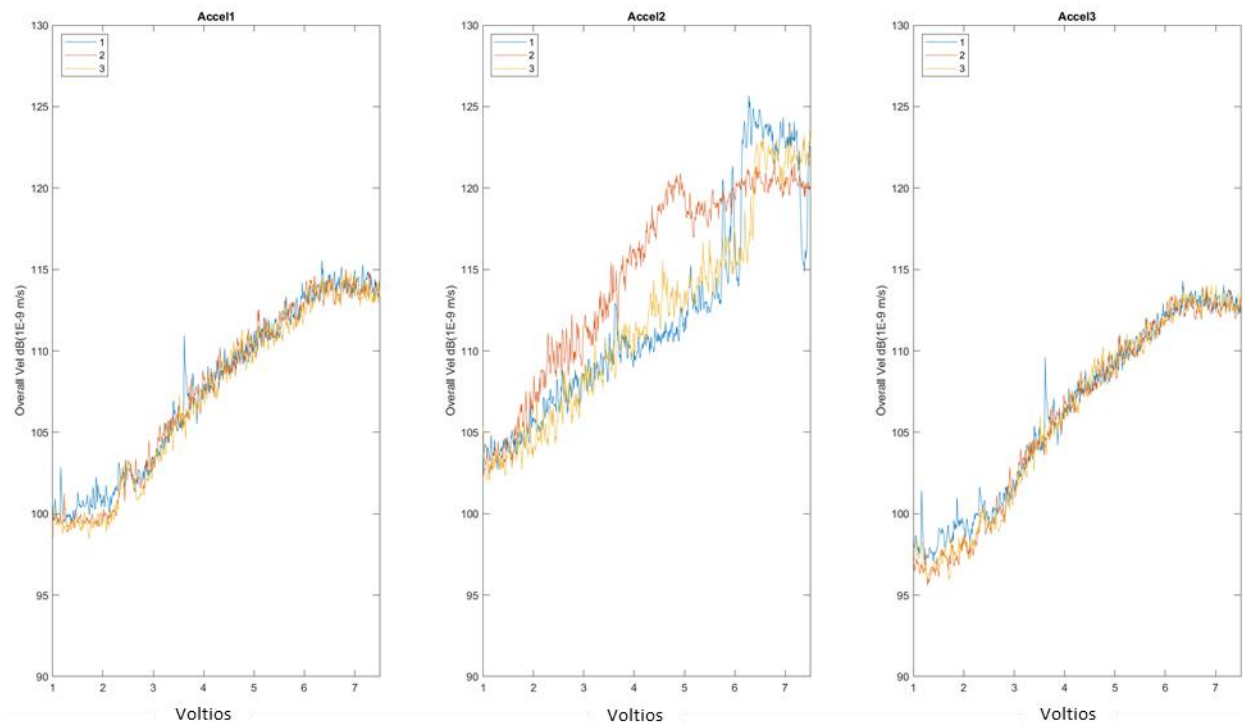
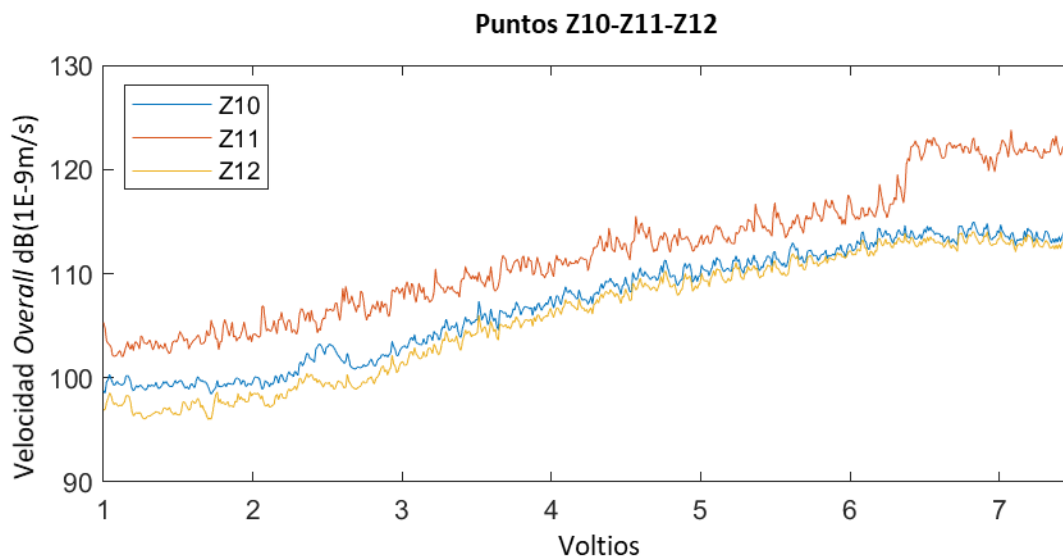
13.3.4.3 Puntos Z7 – Z8 – Z9

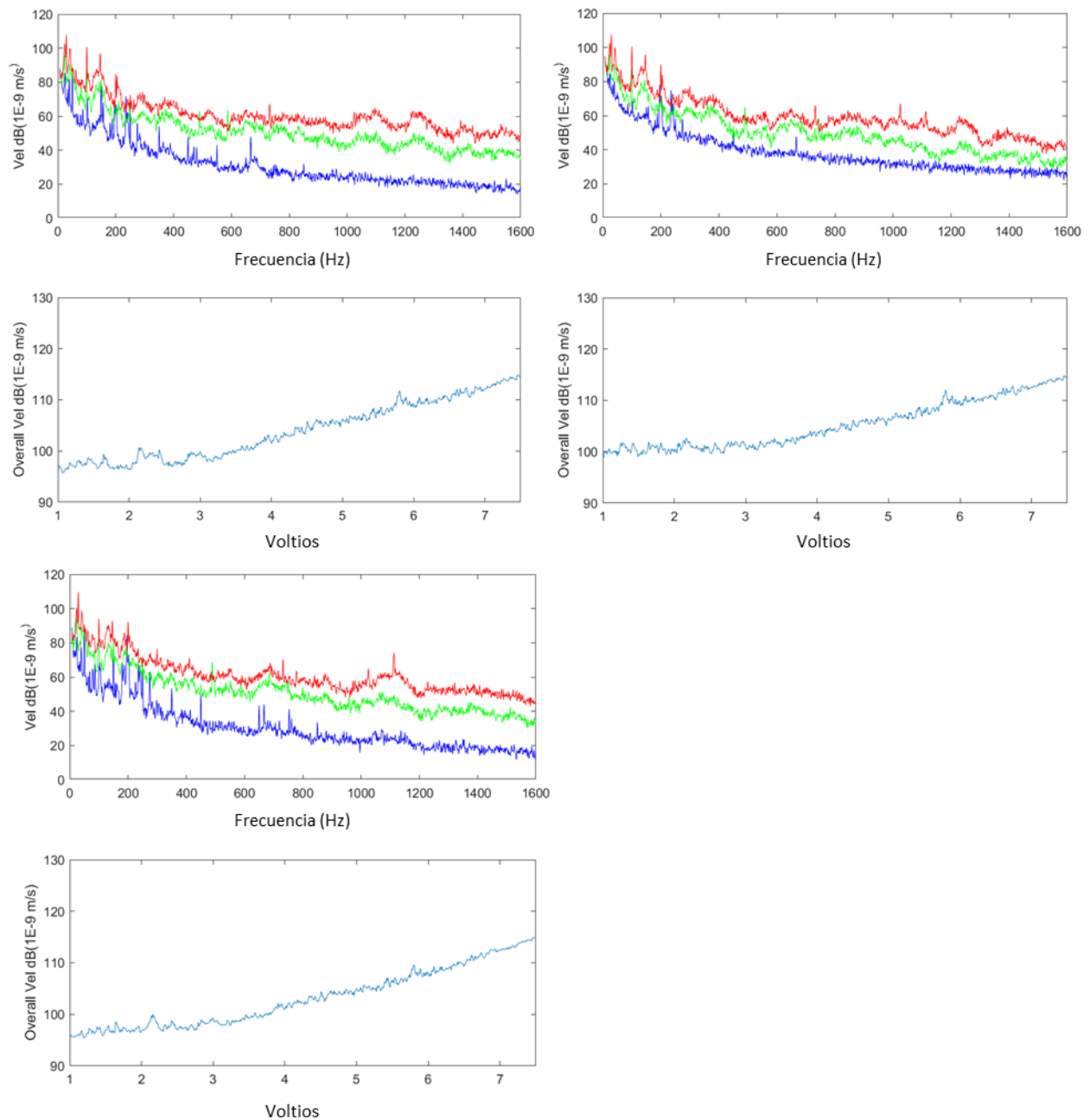
Figura 13.33: Comparación de velocidad *overall* de todas las medidas. Puntos Z7 – Z8 – Z9Figura 13.34: Velocidad *overall* de la medida seleccionada. Puntos Z7 – Z8 – Z9

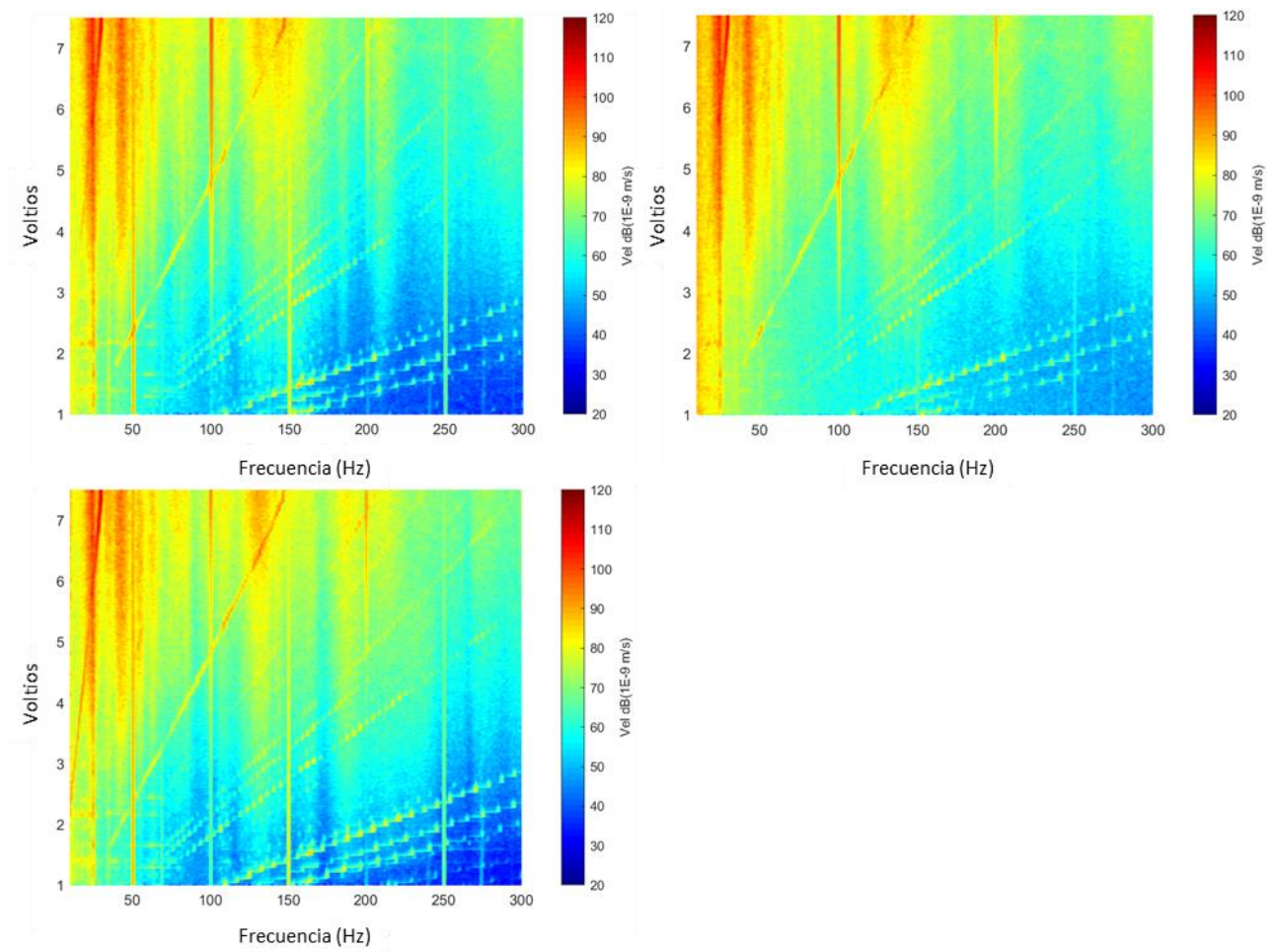
Figura 13.35: Velocidad: 3 niveles y *overall*. Puntos Z7 – Z8 – Z9

Figura 13.36: *Waterfall* 2D de velocidad. Puntos Z7 – Z8 – Z9

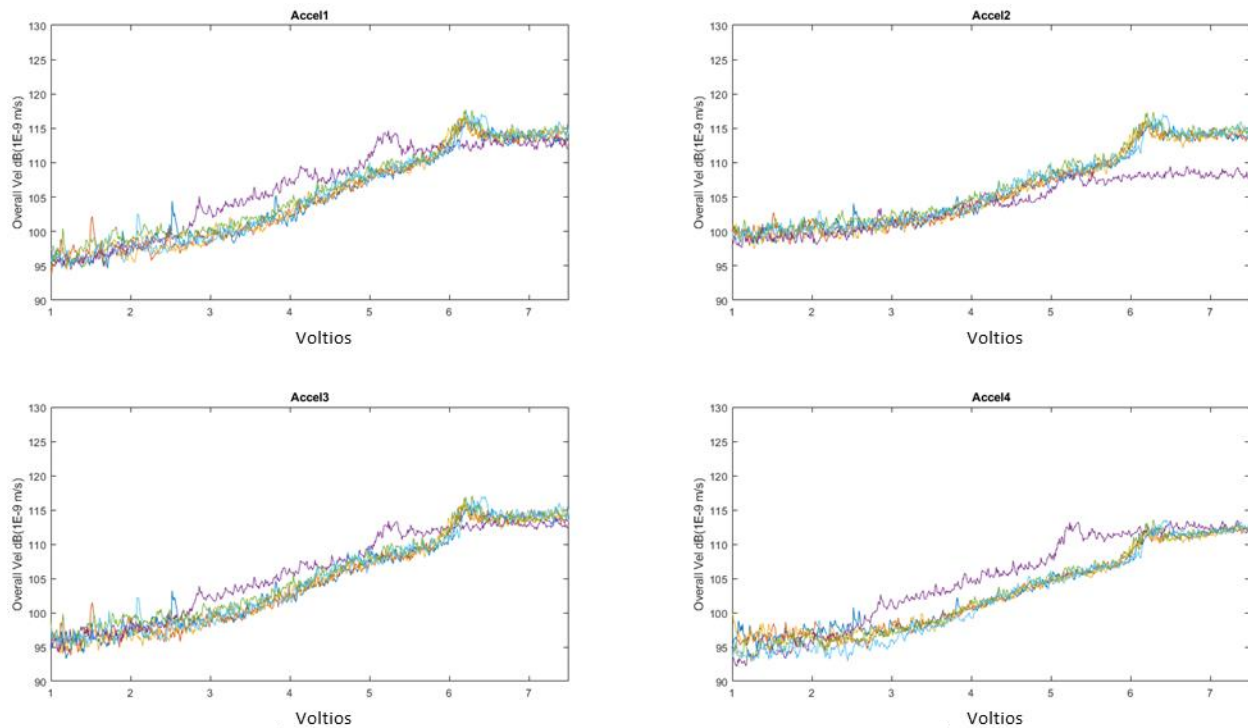
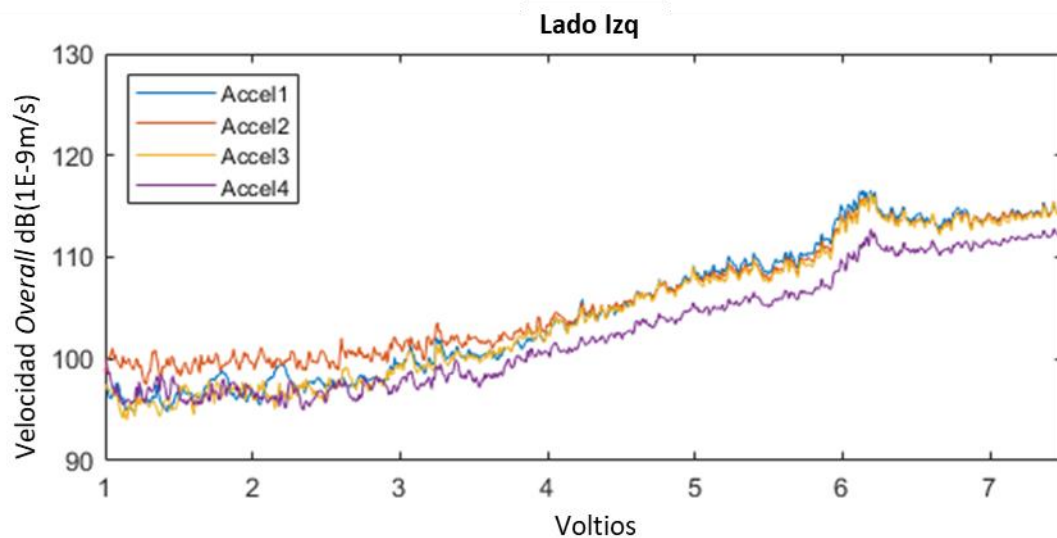
13.3.4.4 Puntos Z10 – Z11 – Z12

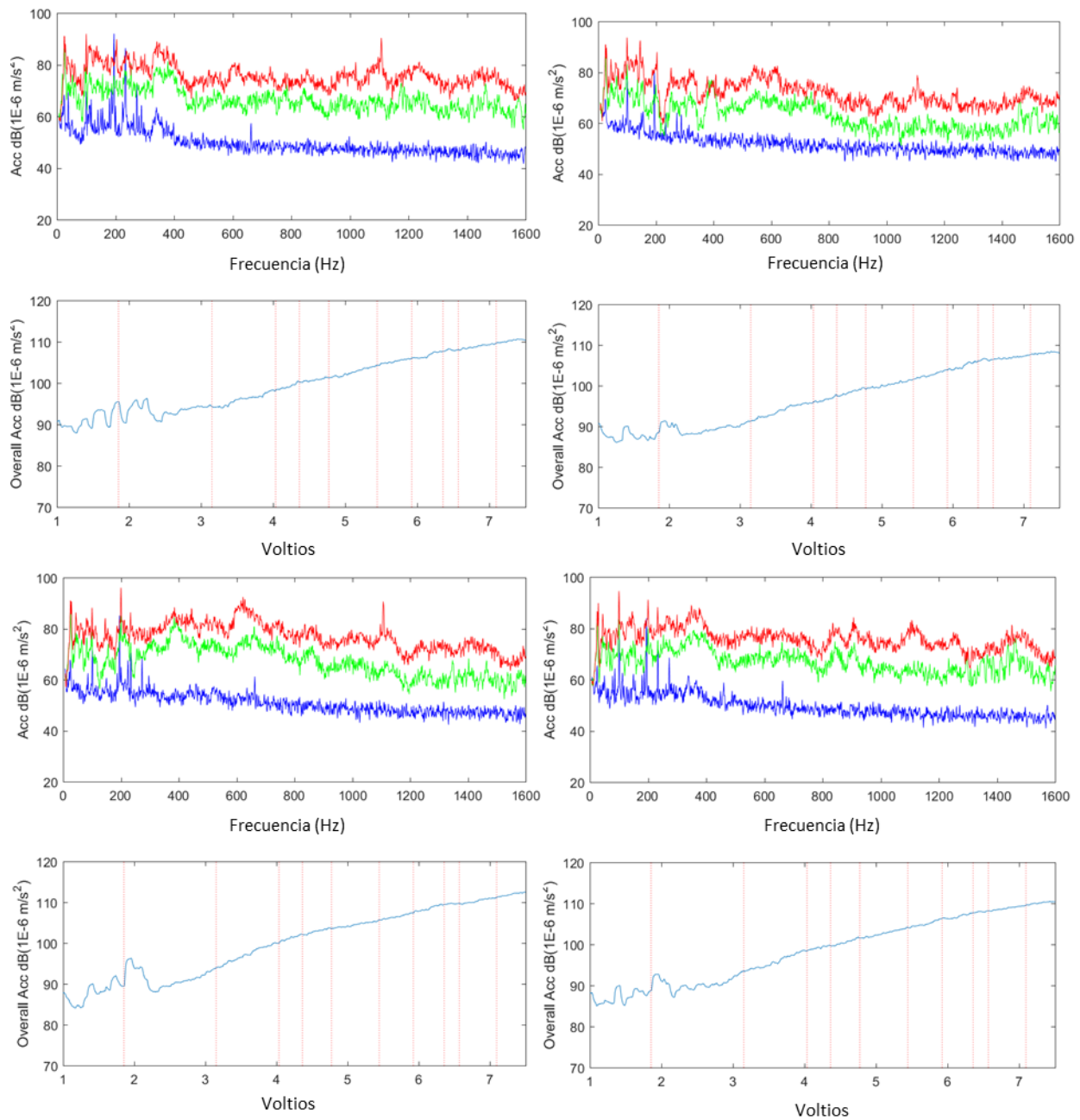
Figura 13.37: Comparación de velocidad *overall* de todas las medidas. Puntos Z10 – Z11 – Z12Figura 13.38: Velocidad *overall* de la medida seleccionada. Puntos Z10 – Z11 – Z12

Figura 13.39: Velocidad: 3 niveles y *overall*. Puntos Z10 – Z11 – Z12

Figura 13.40: *Waterfall* 2D de velocidad. Puntos Z10 – Z11 – Z12

13.3.5 Puntos del cristal, parte izquierda

Figura 13.41: Comparación de velocidad *overall* de todas las medidas. Puntos del cristal, parte izquierdaFigura 13.42: Velocidad *overall* de la medida seleccionada. Puntos del cristal, parte izquierda

Figura 13.43: Aceleración: 3 niveles y *overall*. Puntos del cristal, parte izquierda

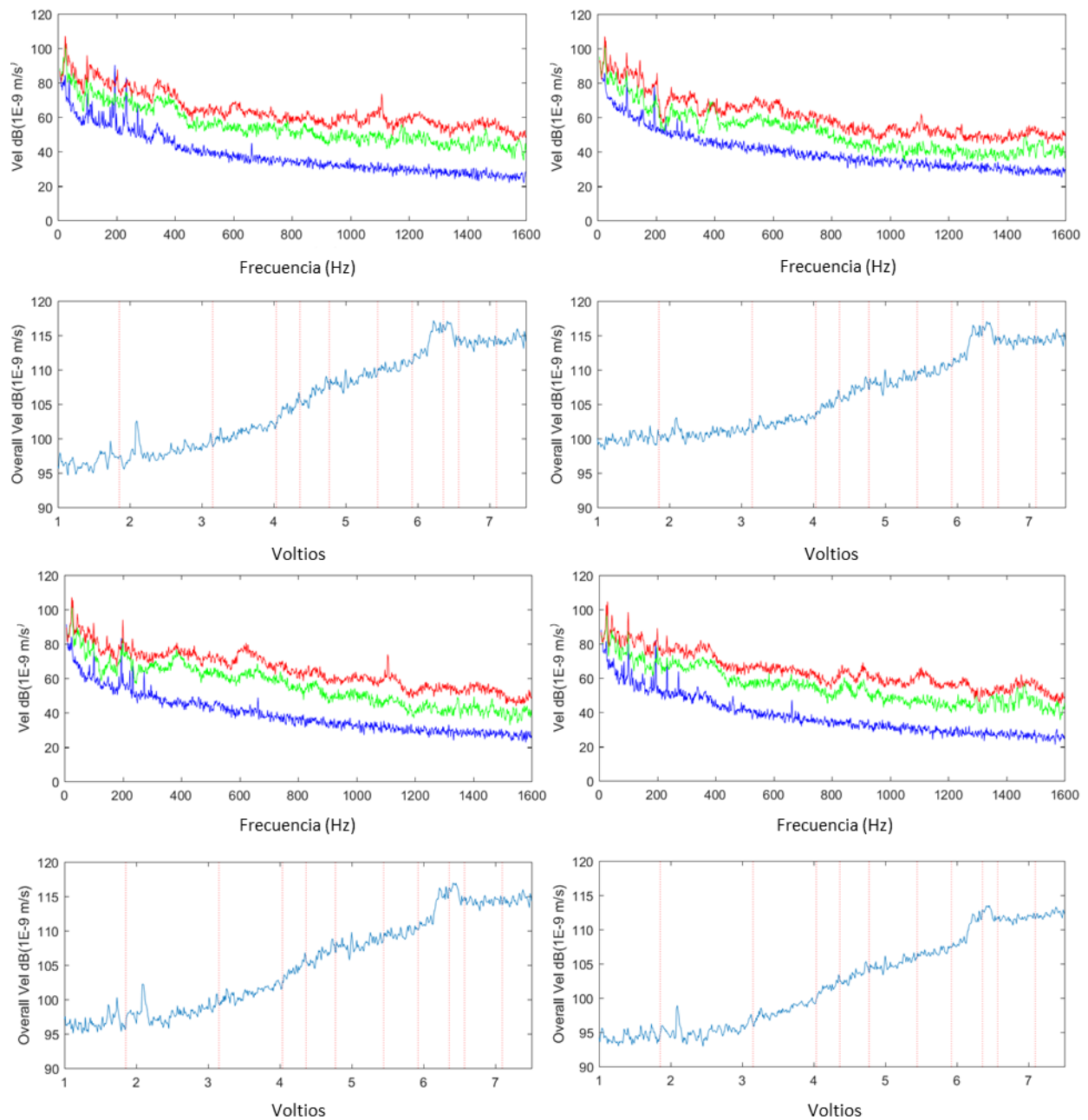
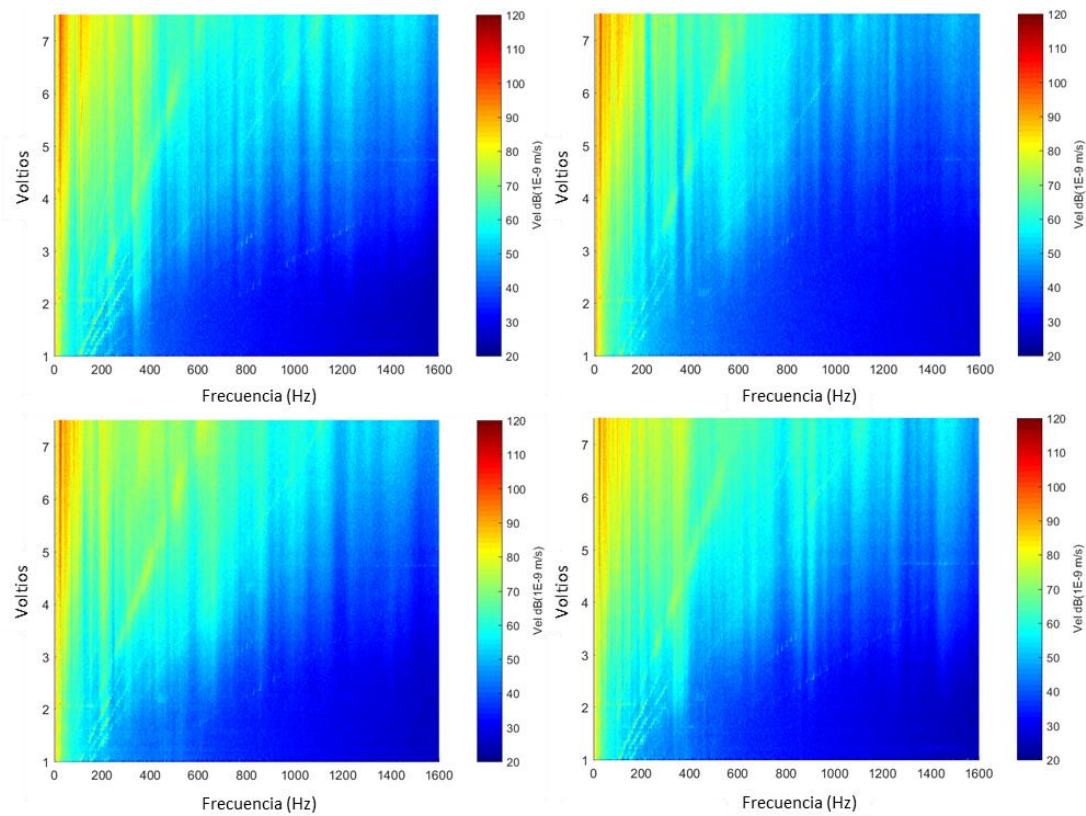
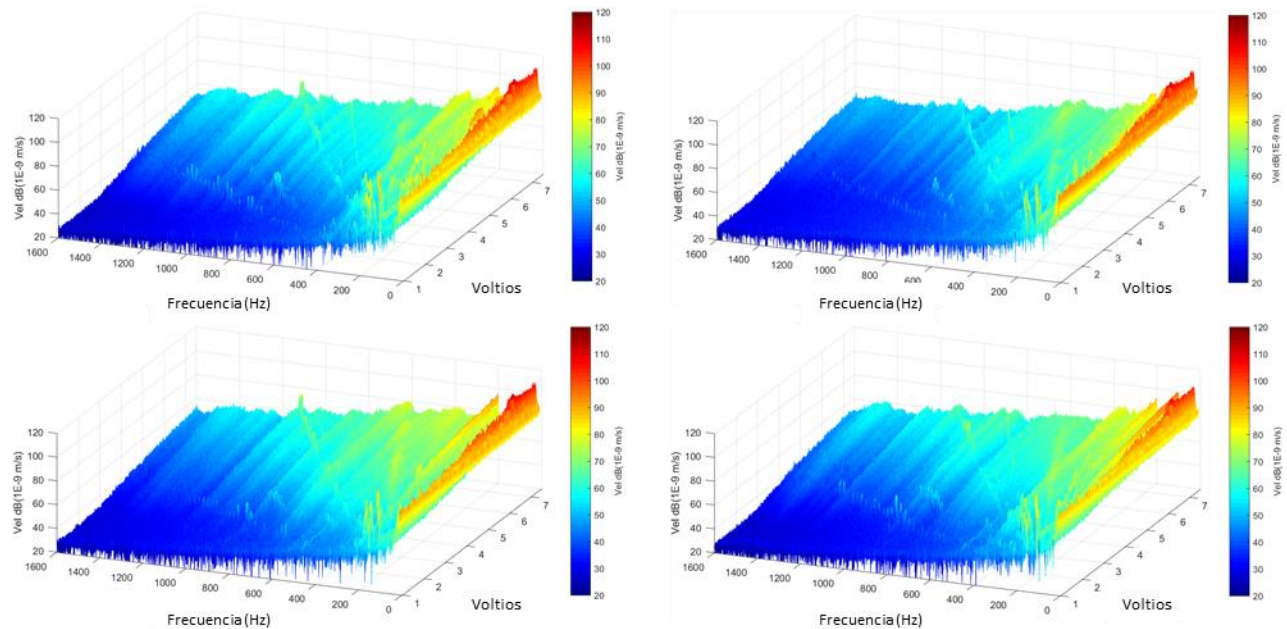
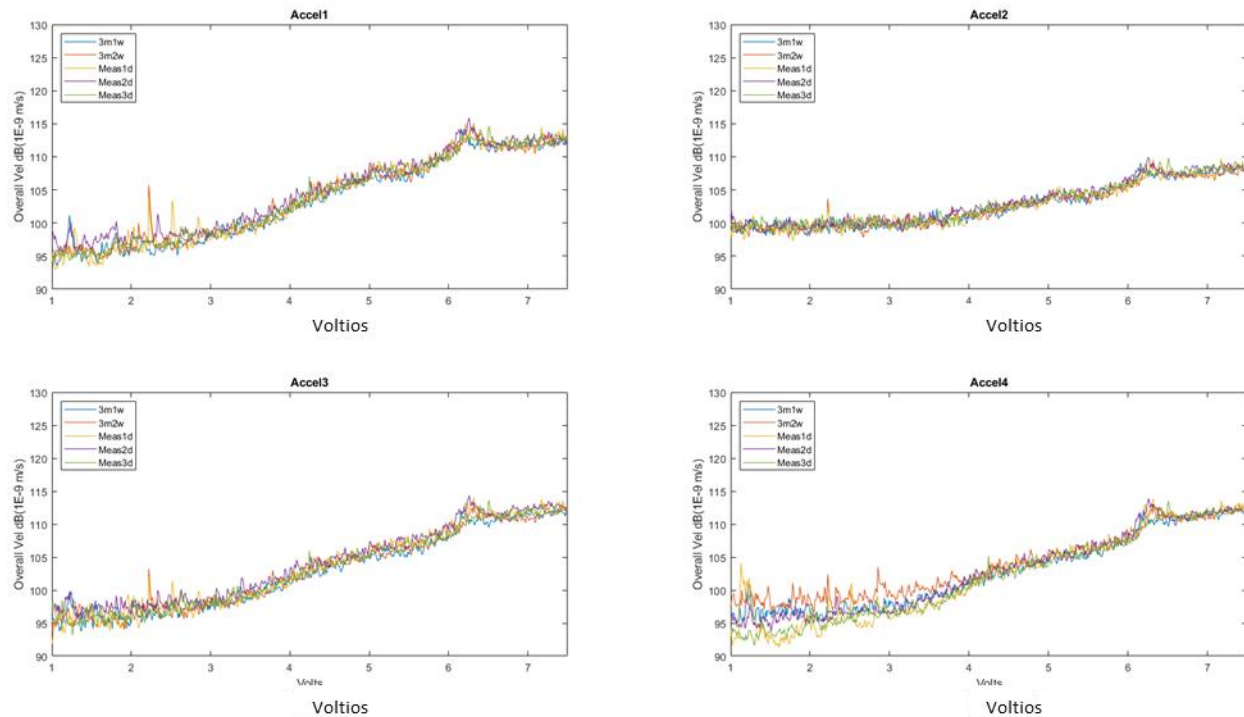
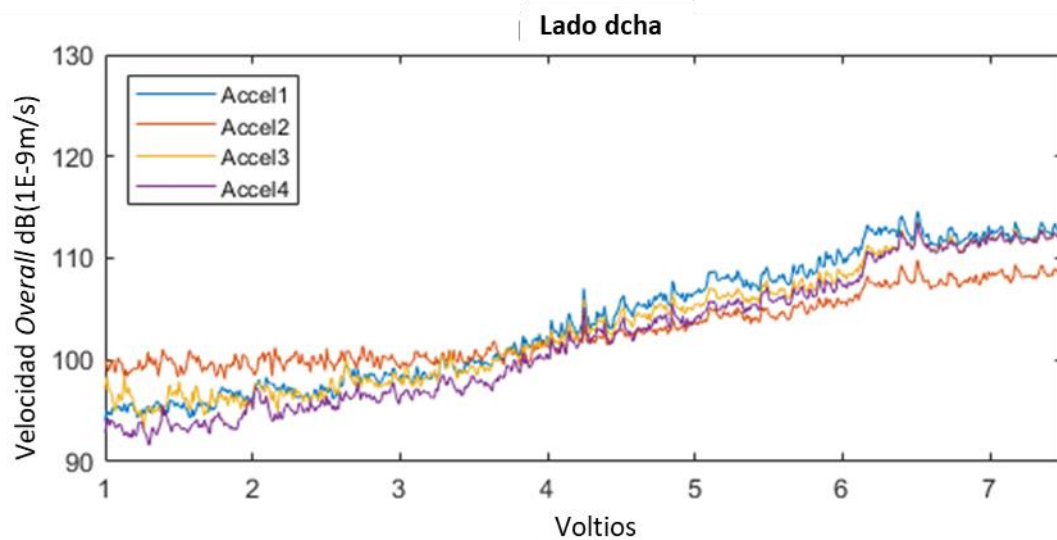


Figura 13.44: Velocidad: 3 niveles y *overall*. Puntos del cristal, parte izquierda

Figura 13.45: *Waterfall* 2D de velocidad. Puntos del cristal, parte izquierdaFigura 13.46: *Waterfall* 3D de velocidad. Puntos del cristal, parte izquierda

13.3.6 Puntos del cristal, parte derecha

Figura 13.47: Comparación de velocidad *overall* de todas las medidas. Puntos del cristal, parte derechaFigura 13.48: Velocidad *overall* de la medida seleccionada. Puntos del cristal, parte derecha

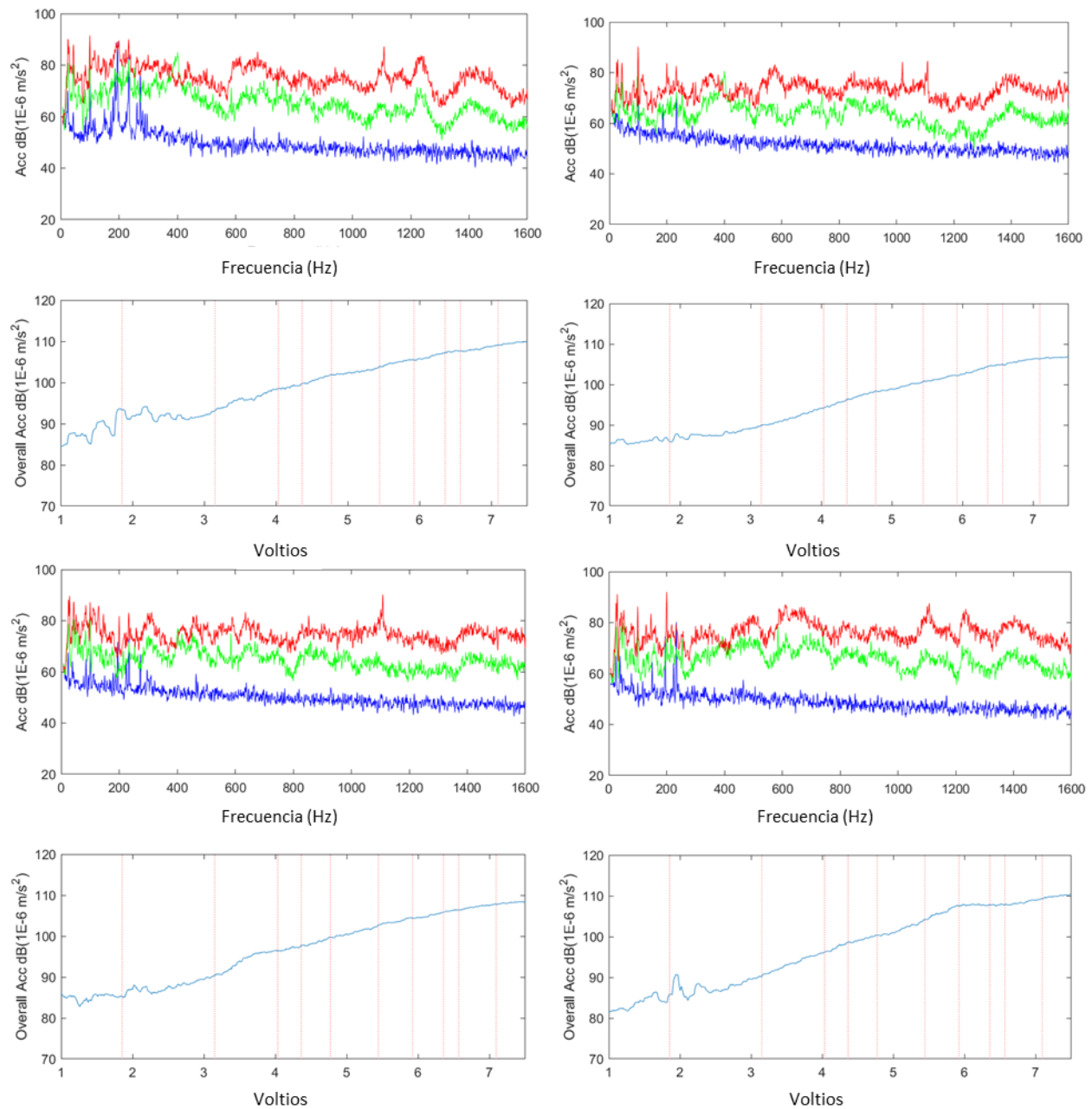


Figura 13.49: Aceleración: 3 niveles y *overall*. Puntos del cristal, parte derecha

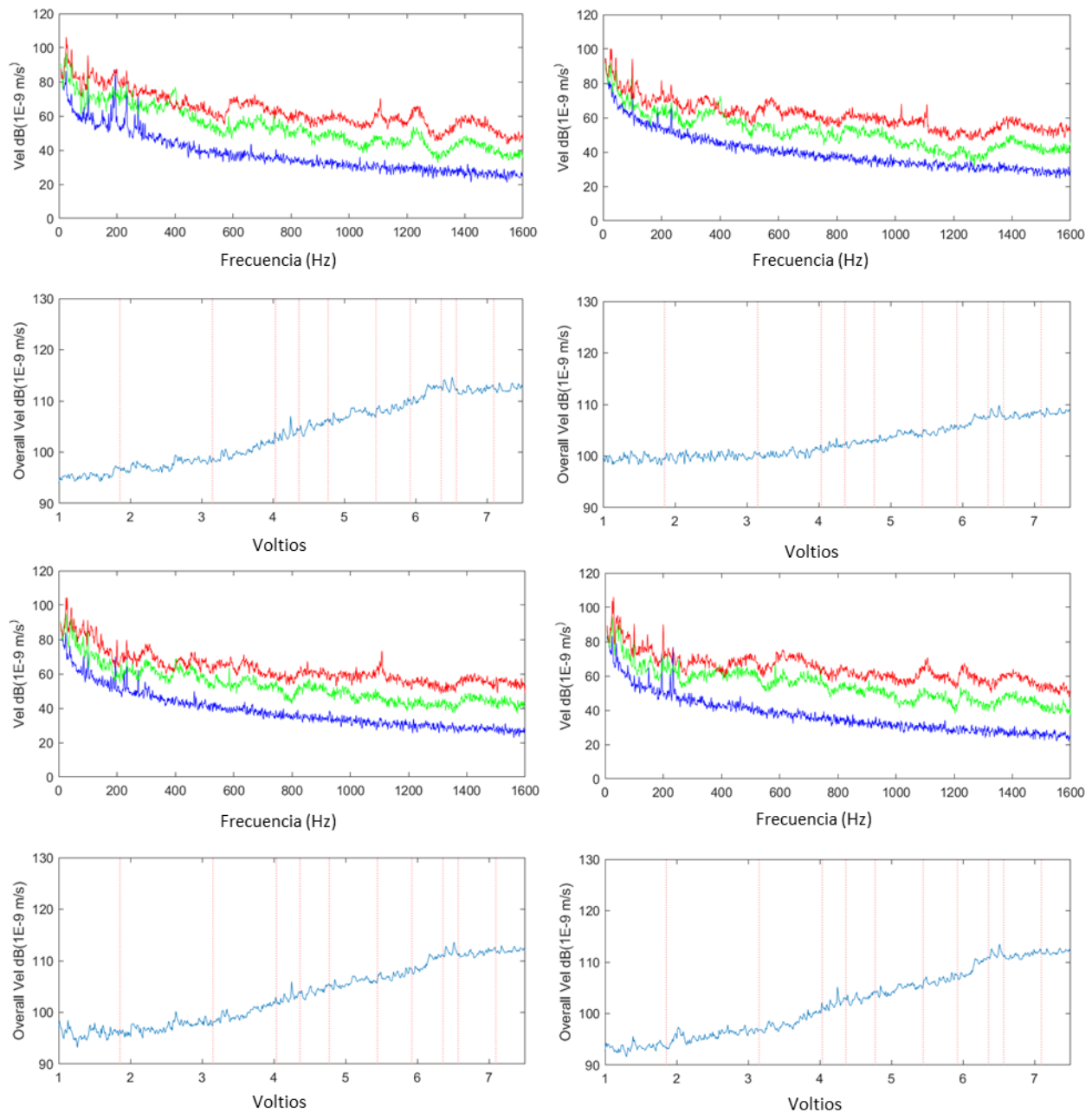
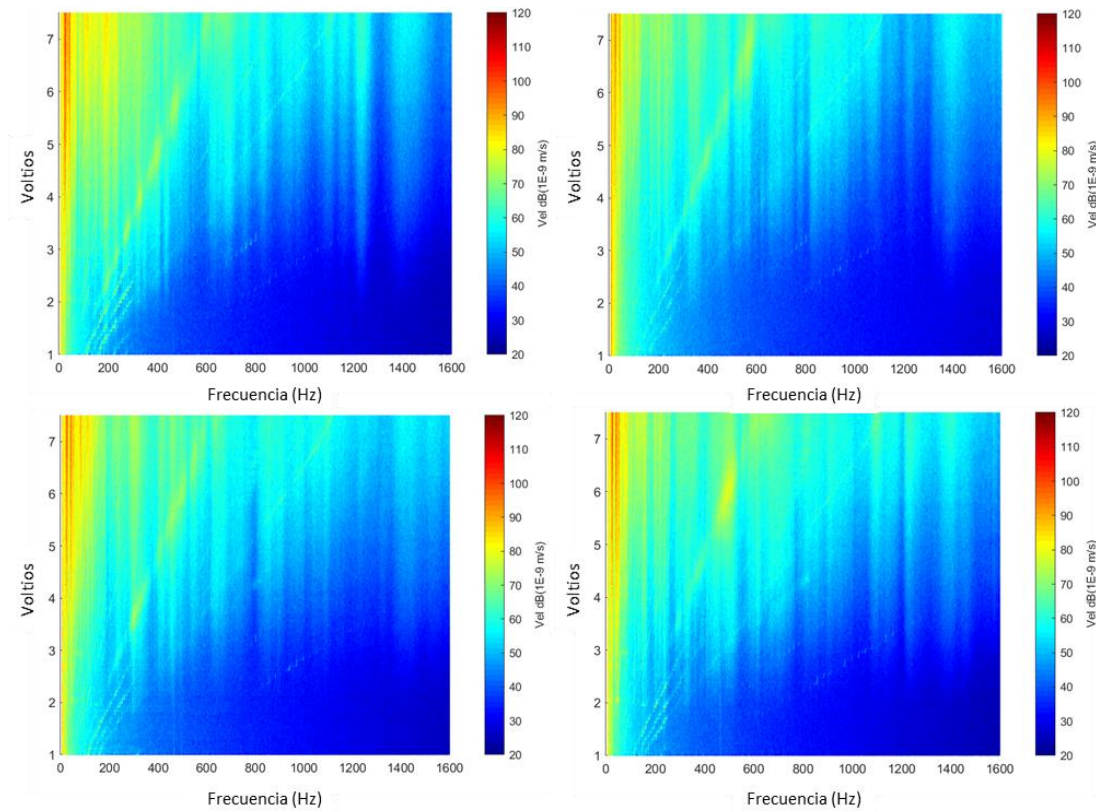
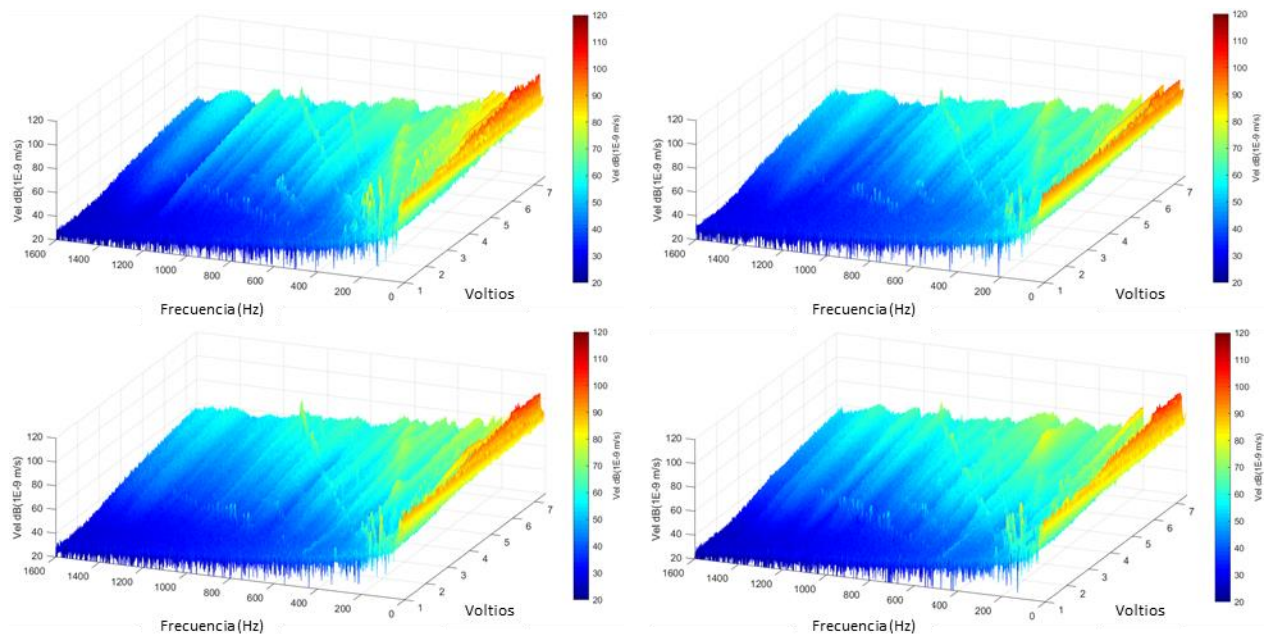
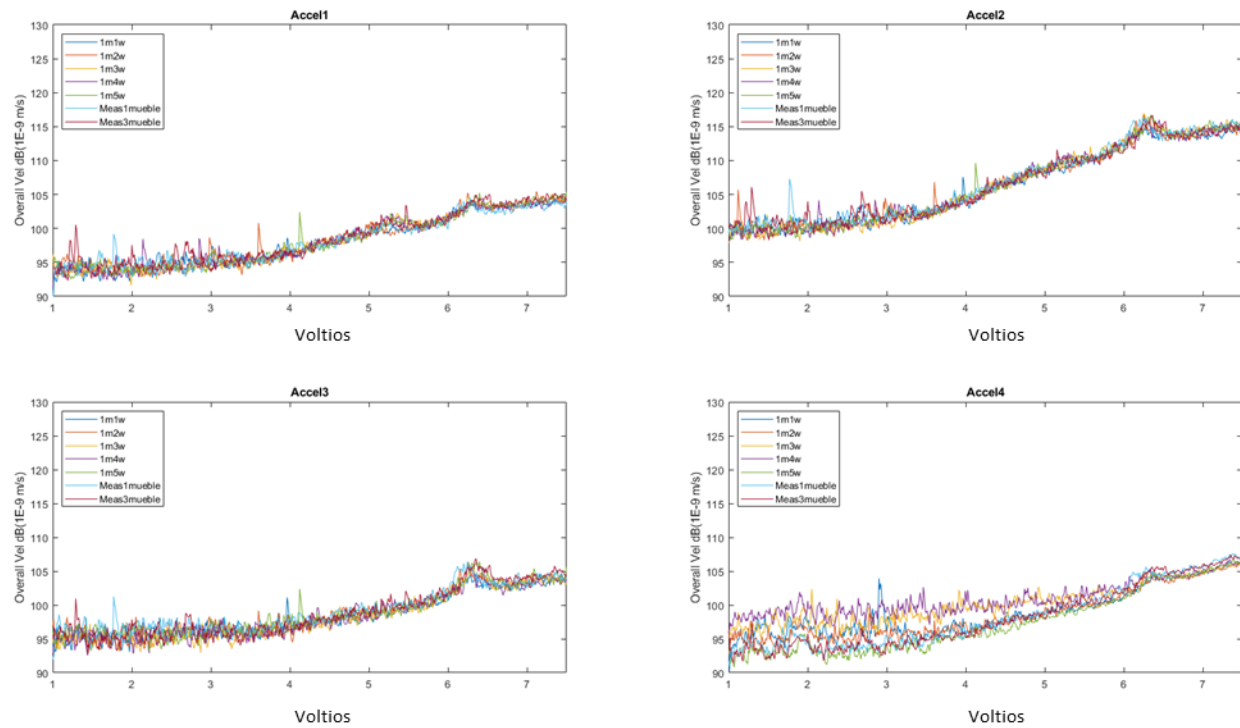
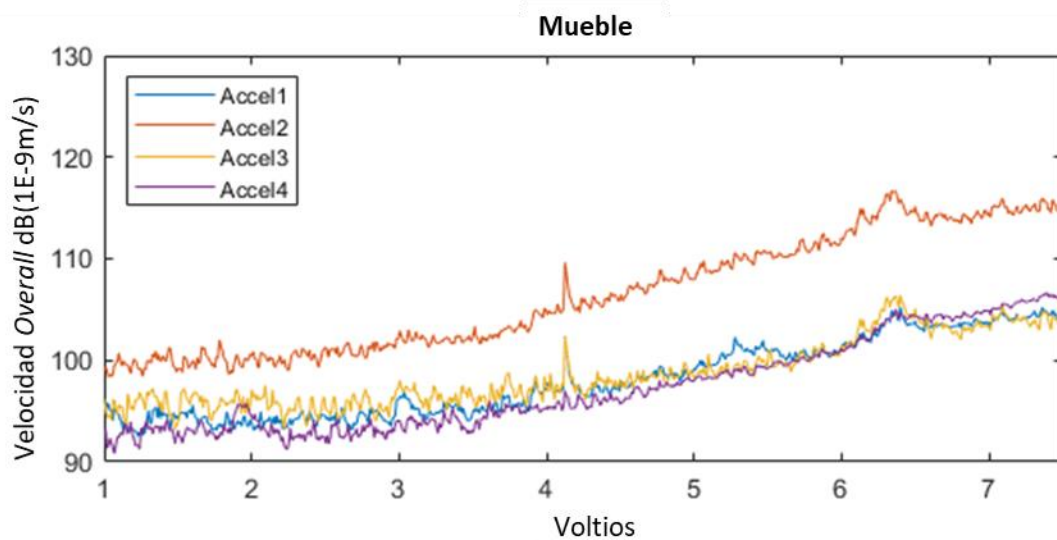
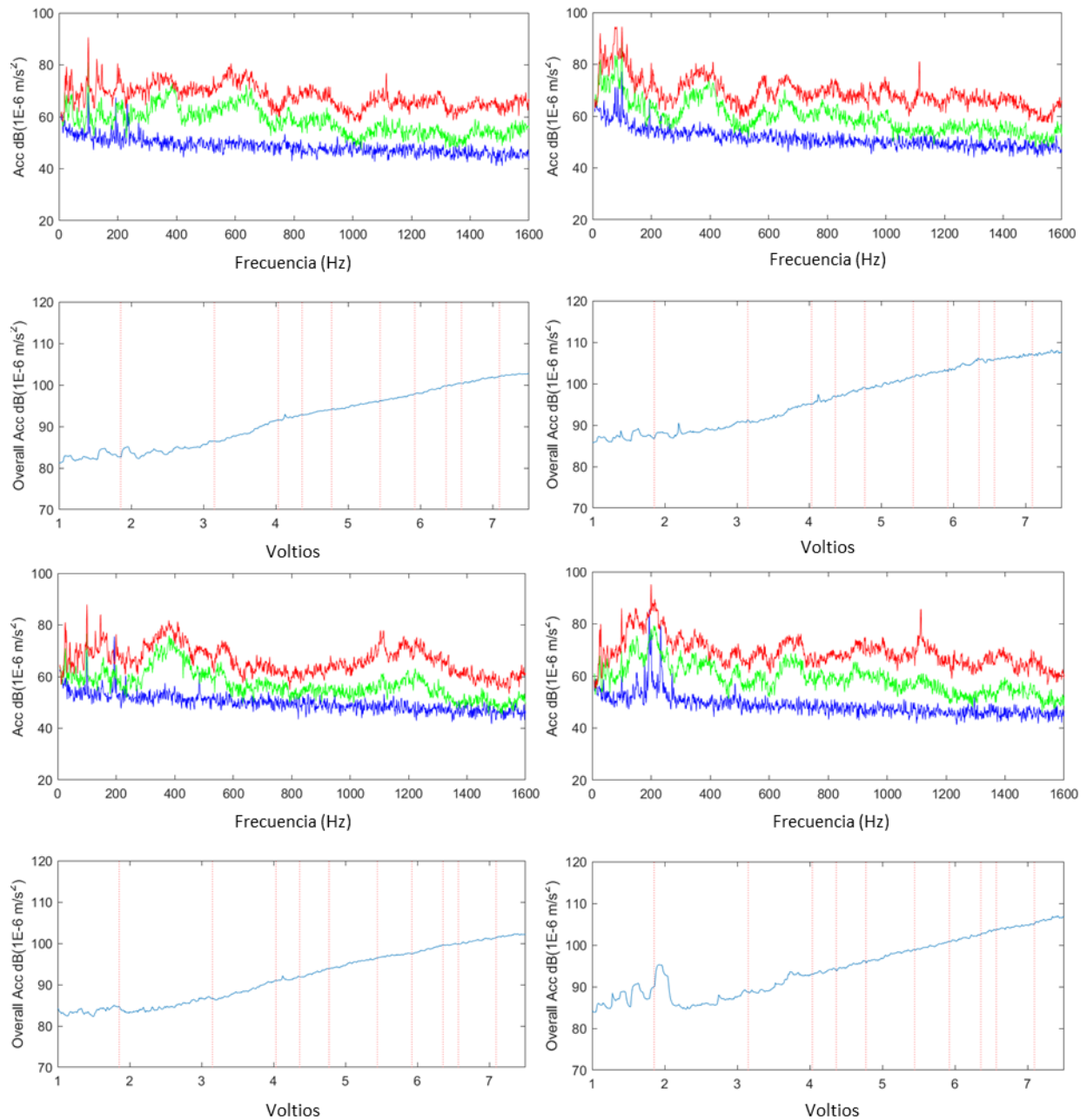


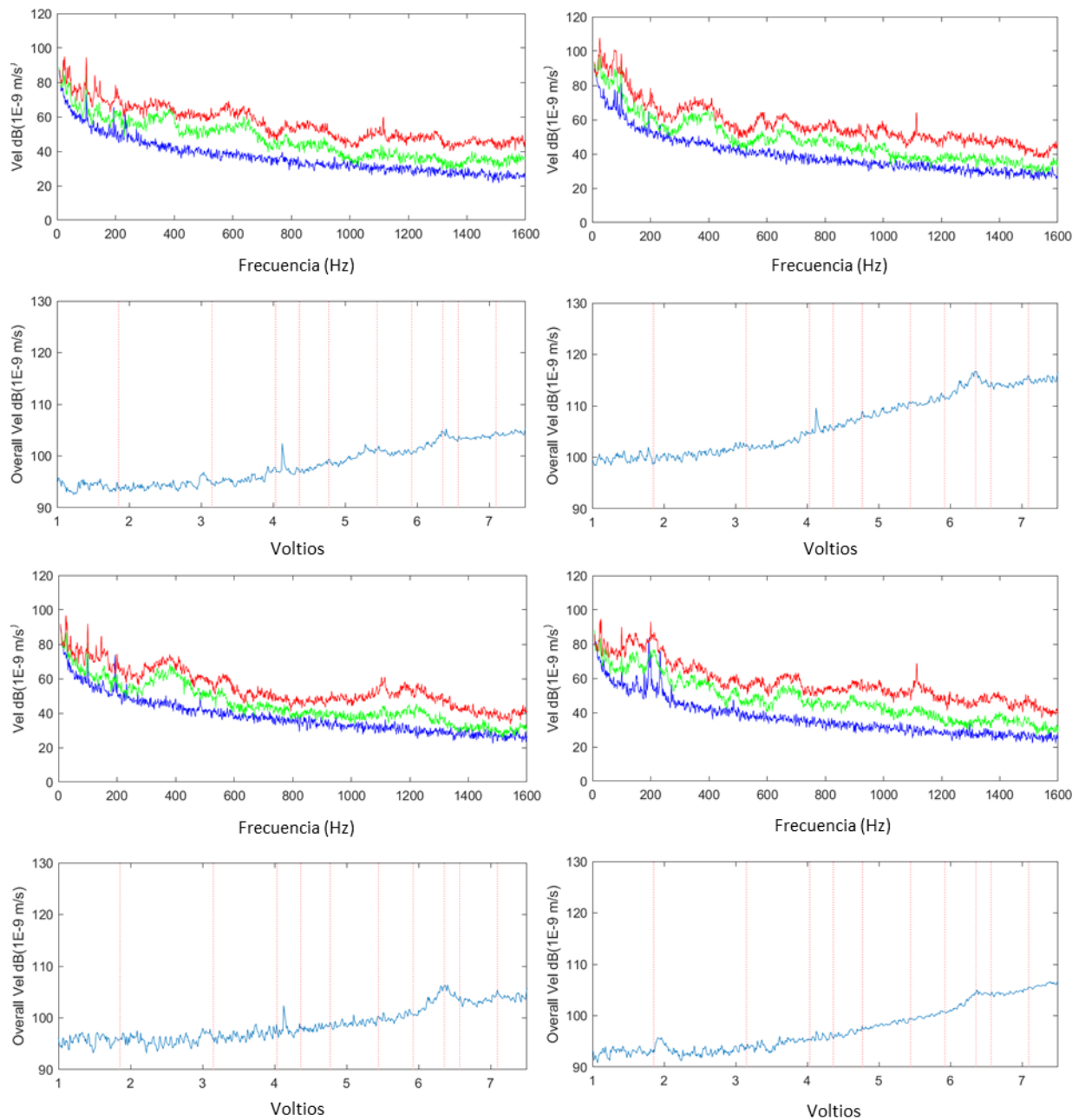
Figura 13.50: Velocidad: 3 niveles y *overall*. Puntos del cristal, parte derecha

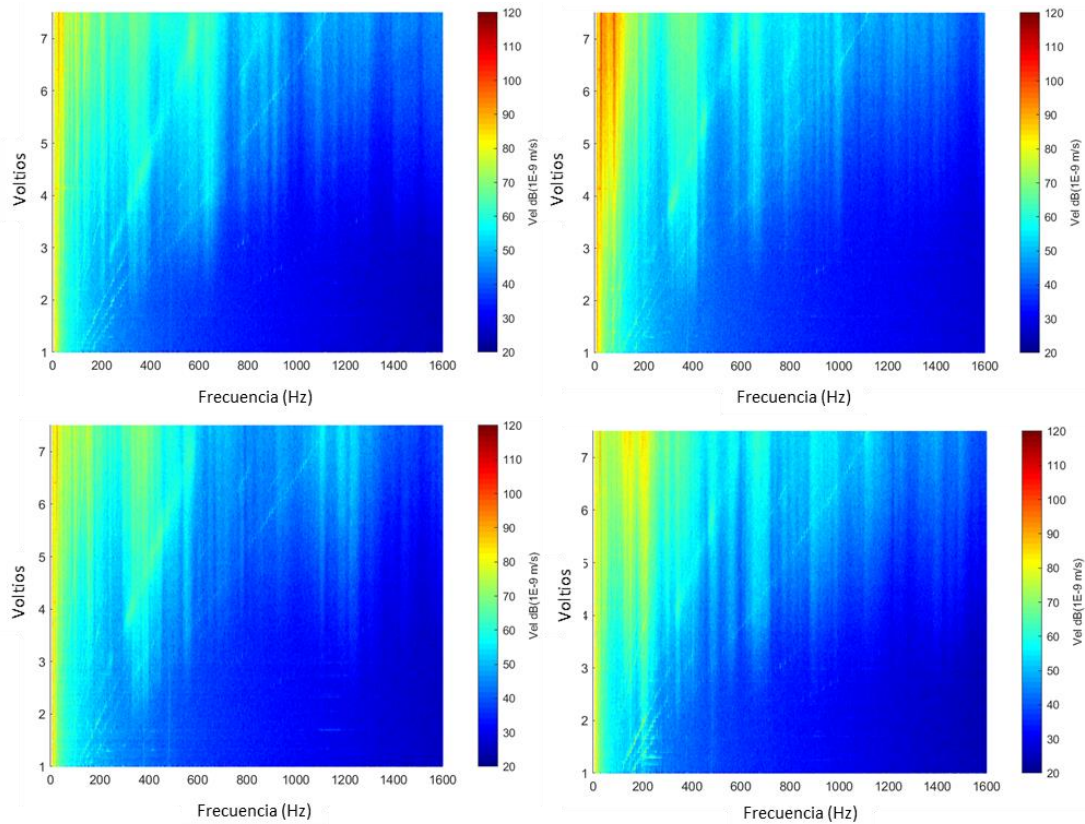
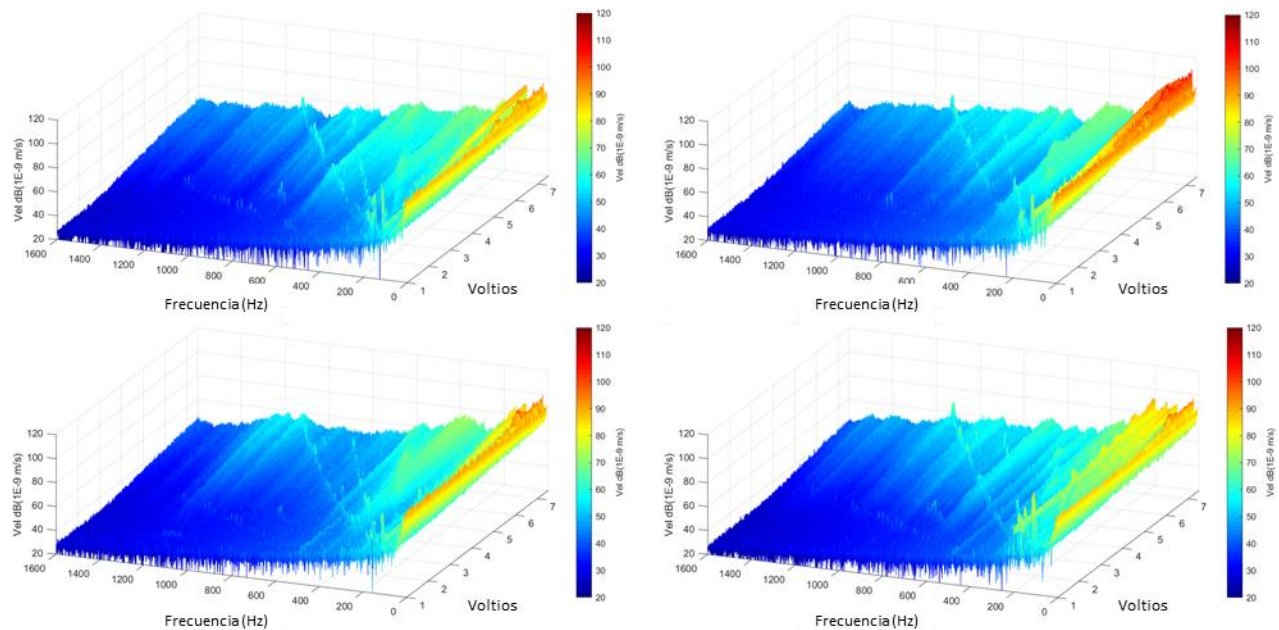
Figura 13.51: *Waterfall* 2D de velocidad. Puntos del cristal, parte derechaFigura 13.52: *Waterfall* 3D de velocidad. Puntos del cristal, parte derecha

13.3.7 Puntos del mueble

Figura 13.53: Comparación de velocidad *overall* de todas las medidas. Puntos del muebleFigura 13.54: Velocidad *overall* de la medida seleccionada. Puntos del mueble

Figura 13.55: Aceleración: 3 niveles y *overall*. Puntos del mueble

Figura 13.56: Velocidad: 3 niveles y *overall*. Puntos del mueble

Figura 13.57: *Waterfall* 2D de velocidad. Puntos del muebleFigura 13.58: *Waterfall* 3D de velocidad. Puntos del mueble

14. Anexo IV: Mapas de vibración

En este anexo se muestra la (casi) totalidad de los mapas de vibración obtenidos. Se eligen como frecuencias más relevantes las de resonancia del sistema (26 Hz), las eléctricas (100 y 200 Hz) y las pertenecientes a los órdenes de excitación del sistema ($1x \sim 29,3$ Hz y $38x \sim 1.114$ Hz). Se muestran a continuación los mapas de vibración de velocidad y de aceleración con escalas absolutas para cada parámetro, ordenados según la frecuencia ascendentemente.

14.1 Mapas de velocidad de vibración

- El mapa correspondiente a 26 Hz posee un máximo de 104 dB y un mínimo de 84 dB en el lado izquierdo, así como un máximo de 107 dB y un mínimo de 87 dB en el lado derecho.
- El mapa correspondiente al orden $1x$ posee un máximo de 106 dB y un mínimo de 85 dB en el lado izquierdo, así como un máximo de 78 dB y un mínimo de 53 dB en el lado derecho.
- El mapa correspondiente a 100 Hz posee un máximo de 105 dB y un mínimo de 83 dB en el lado izquierdo, así como un máximo de 108 dB y un mínimo de 79 dB en el lado derecho.
- El mapa correspondiente a 200 Hz posee un máximo de 92 dB y un mínimo de 75 dB en el lado izquierdo, así como un máximo de 92 dB y un mínimo de 73 dB en el lado derecho.
- El mapa correspondiente al orden $38x$ posee un máximo de 76 dB y un mínimo de 53 dB en el lado izquierdo, así como un máximo de 68 dB y un mínimo de 55 dB en el lado derecho (Figura 14.1).

Como conclusión se puede observar que en el lado derecho a 100 Hz se encuentra el valor máximo de velocidad de vibración, siendo este mapa, junto al de la frecuencia de resonancia del sistema y al del orden $1x$, los que tienen más influencia en los valores de vibración de velocidad del sistema.

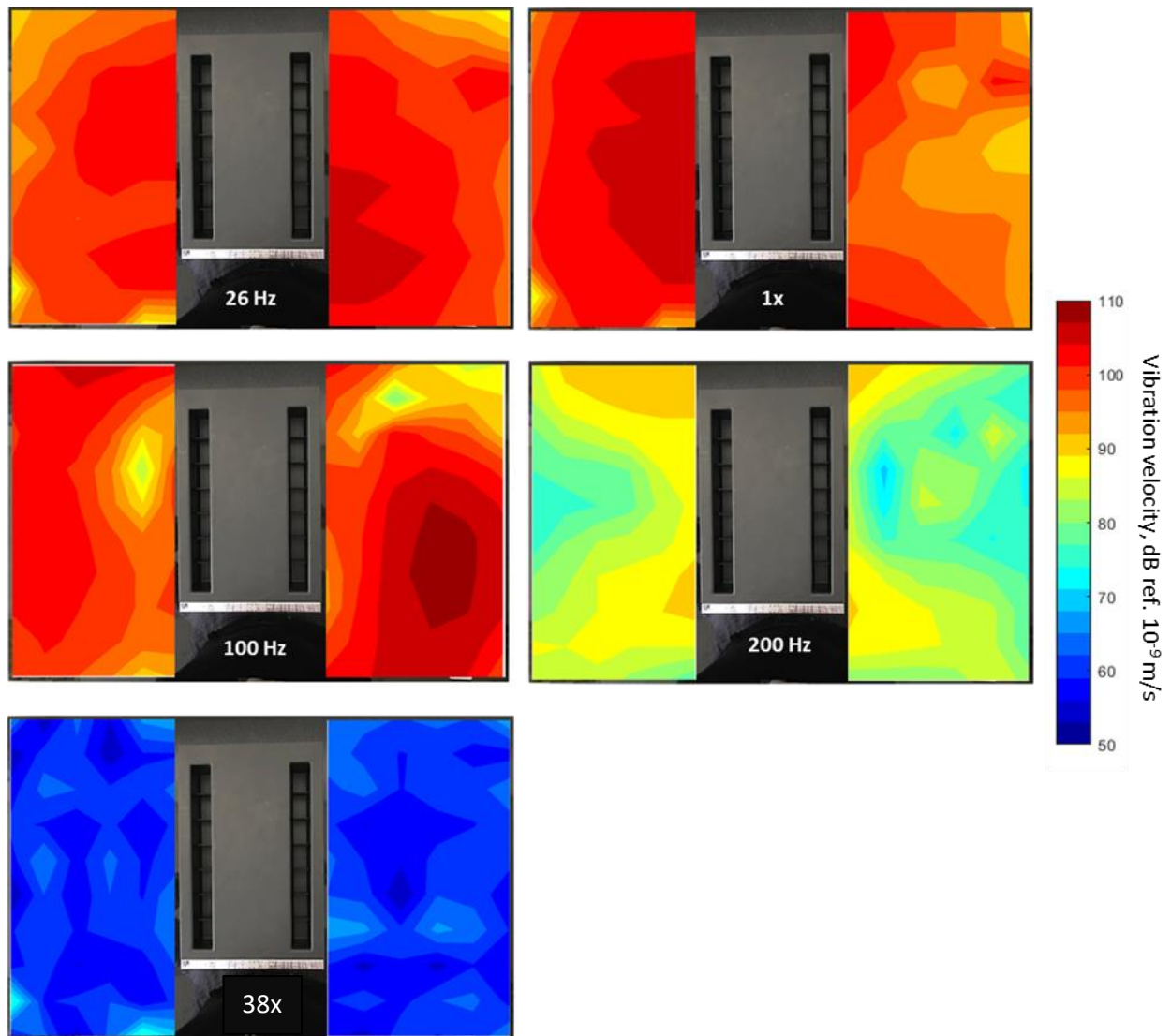


Figura 14.1: Mapas de velocidad de vibración

14.2 Mapas de aceleración de vibración

- El mapa correspondiente a 26 Hz posee un máximo de $2,7 \text{ cm/s}^2$ y un mínimo de $0,3 \text{ cm/s}^2$ en el lado izquierdo, así como un máximo de $3,6 \text{ cm/s}^2$ y un mínimo de $0,4 \text{ cm/s}^2$ en el lado derecho.
- El mapa correspondiente al orden 1x posee un máximo de $3,8 \text{ cm/s}^2$ y un mínimo de $0,3 \text{ cm/s}^2$ en el lado izquierdo, así como un máximo de $2,6 \text{ cm/s}^2$ y un mínimo de $0,5 \text{ cm/s}^2$ en el lado derecho.
- El mapa correspondiente a 100 Hz posee un máximo de $11,2 \text{ cm/s}^2$ y un mínimo de $0,9 \text{ cm/s}^2$ en el lado izquierdo, así como un máximo de $16,1 \text{ cm/s}^2$ y un mínimo de $0,6 \text{ cm/s}^2$ en el lado derecho.
- El mapa correspondiente a 200 Hz posee un máximo de 5 cm/s^2 y un mínimo de $0,7 \text{ cm/s}^2$ en el lado izquierdo, así como un máximo de $4,9 \text{ cm/s}^2$ y un mínimo de $0,4 \text{ cm/s}^2$ en el lado derecho.
- El mapa correspondiente al orden 38x posee un máximo de $4,3 \text{ cm/s}^2$ y un mínimo de $0,3 \text{ cm/s}^2$ en el lado izquierdo, así como un máximo de $1,7 \text{ cm/s}^2$ y un mínimo de $0,3 \text{ cm/s}^2$ en el lado derecho (Figura 14.2).

Como conclusión se puede observar claramente que el mapa correspondiente a la frecuencia eléctrica de 100 Hz es en el que se registran los mayores valores de aceleración de vibración, siendo los valores del resto de frecuencias elegidas como muestra prácticamente irrelevantes.

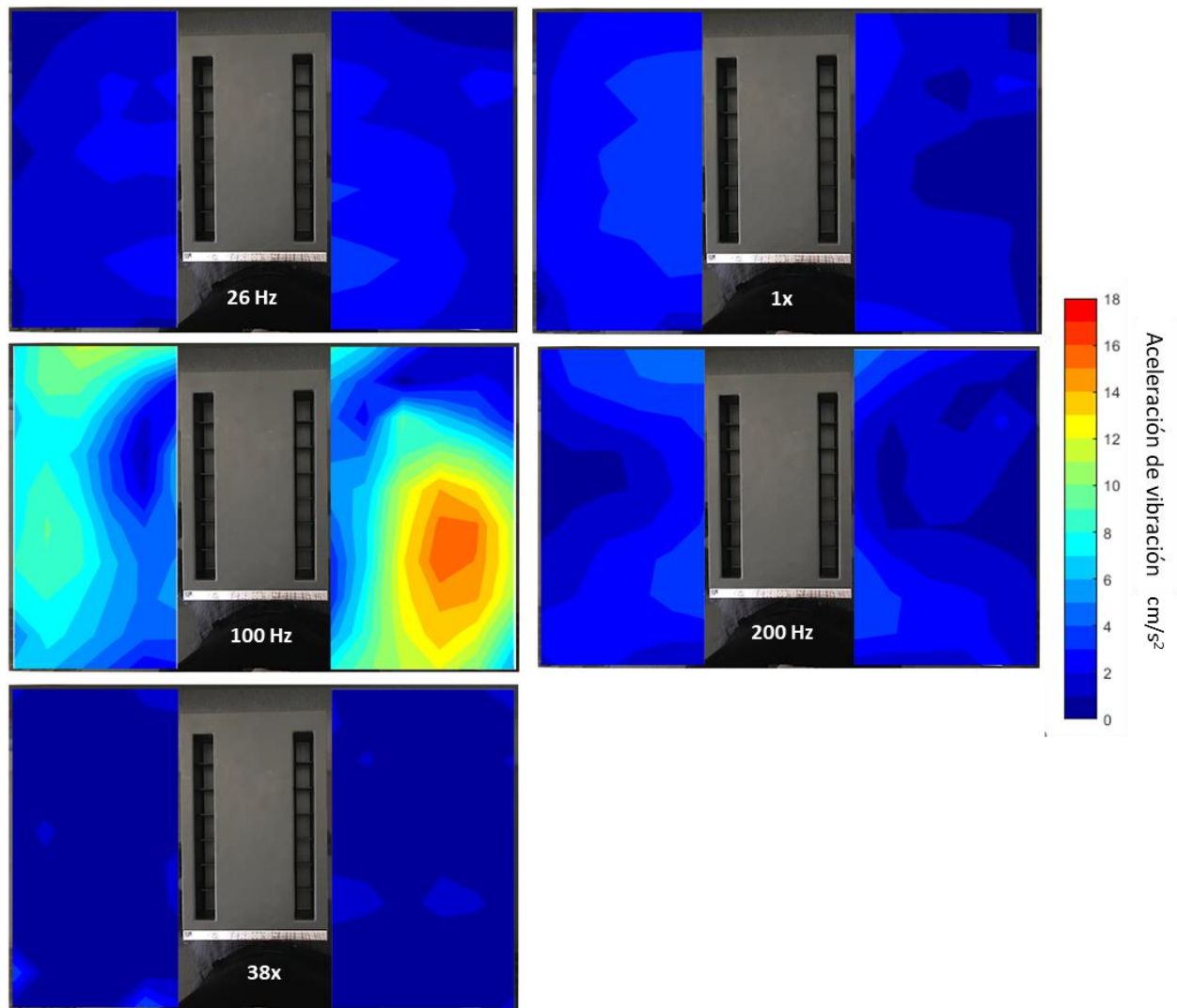


Figura 14.2: Mapas de aceleración de vibración